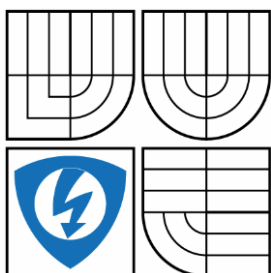


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologií

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODELOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH PRVKŮ VOZIDEL

MODELING OF ELECTRICAL COMPONENTS VEHICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

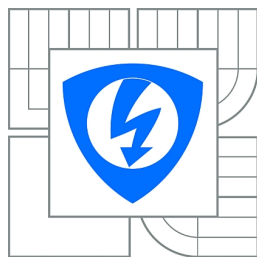
Bc. Valentin Kósa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Valentin Kósa

ID: 136544

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Modelování elektrických prvků vozidel

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte literární rešerši z oblasti elektrických prvků a zatěžovacích cyklů současných a budoucích elektrických vozidel, zaměřte se zejména na různé typy elektromotorů a baterie.
2. Na základě této rešerše si zvolte prvek nebo prvky, které budete modelovat v prostředí Matlab/Simulink. Model vytvořte způsobem vhodným pro jeho začlenění do knihovny elektrických prvků využitelných pro modelování vozidel externího pracoviště ÚADI FSI VUT v Brně.
3. Sestavte model elektrického pohonu vozidla pro vybraný pohon a zdroj energie a proveďte simulační výpočty jízdy.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a vlastnosti použitých modelovaných prvků z hlediska využití v elektromobilech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] VLK, F. Dynamika motorových vozidel. Nakladatelství VLK, Brno, 2000, ISBN 80-238-5273-6.
[2] Dle pokynů konzultanta

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 18.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou elektrických vozidel. Úvodem poskytuje přehled o možných zdrojích elektrické energie a typech pohonů aplikovatelných pro elektrická vozidla. Hlavní částí práce je vytvoření modelu vozidla s pohonem a se zdrojem energie v programu Simulink. Výsledný model vozidla obsahuje model superkondenzátoru a synchronního motoru s permanentním magnetem. Vozidlo v modelu je představováno pomocí zátěže elektrického pohonu. V závěru práce jsou na vytvořeném modelu provedeny simulace jízd a následně jsou výsledky analyzovány.

Klíčová slova

Elektrické vozidlo, superkondenzátor, synchronní motor s permanentním magnetem, Simulink.

Abstract

Master's thesis deals with the issue of electric vehicles. In thesis's outset is overview about sources of electric power and types of electric engines applicable for electric vehicles. The main part of this document is creating model of vehicles with engine and source of power for them in Simulink. The resulting model includes models of ultracapacitor and synchronous motor with permanent magnets. Vehicles in model is presented by load of electric engine. In last part of document are executes ride simulations on the model which was created and subsequently simulations are analyzed.

Keywords

Electric vehicle, ultracapacitor, synchronous motor with permanent magnets , Simulink

Bibliografická citace:

KÓSA, V. *Modelování elektrických prvků vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marie Havlíková, Ph. D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modelování elektrických prvků vozidel jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **18. května 2015**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí mé diplomové práce Ing. Marií Havlíkové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou pomoc a také děkuji Ing. Petru Portešovi, Dr. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **18. května 2015**

.....
podpis autora

OBSAH

Obsah	7
Úvod.....	9
1 Elektrická vozidla [1] [3].....	10
1.1 Výhody a nevýhody elektrických vozidel.....	11
2 Zdroje energií pro elektrické vozidla.....	12
2.1 Akumulátor [7].....	12
2.2 Palivový článek [3]	13
2.3 Superkondenzátor [9].....	14
2.3.1 Princip funkce [4] [15].....	15
2.3.2 Technologie superkondenzátorů	16
2.3.3 Propojení a použití [15]	18
3 Elektrické motory v elektrických vozidlech [1]	19
3.1 Stejnoseměrný motor	19
3.2 Asynchronní motor.....	21
3.3 Synchronní motor.....	21
3.4 Synchronní motor s permanentním magnetem.....	22
3.5 Porovnávání motorů pro elektrická vozidla	23
3.6 Pokročilé synchronní motory s PM [1]	24
3.6.1 Statorové PM motory.....	24
3.6.2 VR PM motory.....	27
3.6.3 Porovnání pokročilých synchronních motorů s PM	29
4 Modelování elektrických prvků	31
4.1 Simulink [8]	31
4.2 Modelování superkondenzátoru	32
4.2.1 Základný popis kondenzátoru [9]	32
4.2.2 Model superkondenzátoru.....	33
4.2.3 Parametre modelu	34
4.3 Matematické transformace [12] [13].....	36
4.3.1 Clarkova transformace	36
4.3.2 Parkova transformace	37
4.4 Modelování synchronního motoru s PM [10] [13]	38
4.4.1 Matematický popis synchronního motoru s PM.....	39
4.4.2 Vektorové řízení [13][14]	43
4.4.3 Odstranění křížových vazeb proudu motoru [13]	44
4.4.4 Výstupní proud z PMSM	44
4.4.5 Návrh regulátorů	45
4.4.6 Proudové a napěťové omezení [19]	47
4.5 Popis dynamiky vozidla [2]	47
4.5.1 Jednotný popis modelu PMSM a vozidla	50

5	Simulace průběhů	54
5.1	Nabíjení superkondenzátoru.....	54
5.2	Simulace jízd.....	54
5.2.1	Rozjezd vozidla.....	55
5.2.2	Brzdění vozidla	57
5.2.3	Jízda po vozovce se sklonem.....	58
5.2.4	Maximální dojezd vozidla	60
6	Analýza provedených simulací	61
6.1	Analýza nabíjení superkondenzátoru	61
6.2	Analýza simulací jízd	61
6.2.1	Analýza rozjezdu	61
6.2.2	Analýza brzdění	62
6.2.3	Analýza jízdy po nakloněné vozovce	63
6.2.4	Analýza maximálního dojezdu vozidla.....	63
7	Závěr	65
	Literatura.....	66
	Použité symboly a zkratky	68
	Seznam příloh	71

ÚVOD

Problematika elektromobilů a hybridních vozidel je v současnosti velmi aktuální záležitostí. A to hlavně kvůli snižování znečištění životního prostředí, používání alternativních zdrojů energie v dopravě i ekonomické výhodnosti. Výhodami elektrických vozidel oproti klasickým vozidlům se spalovacím motorem je jejich jednoduchost a účinnost. Aspekty, které elektrické vozidla potřebují vylepšit, jsou životnost, náklady a hlavně dojezd, který je závislý na kapacitě zdroje energie.

Problematika elektromobilů má dvě hlavní části a to volbu vhodného pohonu pro elektrické vozidlo a poskytování (uschování) dostatku energie ve vozidle pro jízdu.

V posledních letech byly vyzkoušeny různé typy elektrických pohonů pro elektromobily, jako stejnosměrný motor, asynchronní i synchronní motor. Nejvíce používanější jsou synchronní motory a jejich různé modifikace. Jejich hlavní výhody jsou výkonnost a efektivnost vůči stejnosměrným a asynchronním strojům.

Pro akumulování energie u elektrických vozidel se používají různé principy. Aktuálně je nejvíce používán elektrochemický princip akumulování energie. Jejich velkou nevýhodou je potřeba transformace elektrické energie na chemickou (během nabíjení) a následné transformace chemické energie na elektrickou (vybití během jízdy). Tyhle transformace limitují jejich životnost. Druhou alternativou pro akumulování elektrické energie je nová technologie ultrakapacitorů, tzv. superkondenzátorů. Jejich výhodou je, že akumulují energii v elektrické podobě (netransformují ji na jiný druh) a mají vyšší hmotnostní a objemovou hustotu energie i životnost jako akumulátory.

Tato diplomová práce v první části poskytne přehled o jednotlivých druzích elektrických i hybridních vozidel. Následně krátce popíše pro ně aktuální zdroje energie. Vyjmenuje a porovná hlavní i pokročilé typy elektrických strojů aplikovaných v automobilové dopravě.

V hlavní části diplomové práce je vytvoření modelu elektrického vozidla v prostředí MATLAB/Simulink. Zdrojem energie pro vozidlo je superkondenzátor a pohon vozidla představuje synchronní motor s permanentním magnetem. Pomocí vytvořeného modelu jsou nasimulovány různé průběhy jízdy vozidla a následně vyhodnoceny.

1 ELEKTRICKÁ VOZIDLA [1] [3]

Podobně jako u vozidla se spalovacím motorem, hnací ústrojí u elektromobilu je tvořeno z motoru, převodovky, hnacích hřídelů a diferenciálu s rozvodovkou.

V současné době existuje více typů elektrických vozidel. Mezi první typy patří:

Elektrické vozidlo – EV anebo BEV (*Electric Vehicle* anebo *Battery Electric Vehicle*) - nazýváno také elektromobil, používá jenom energii dodávanou z baterií a je poháněno pomocí elektromotoru.

Hybridní vozidlo – HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) – je vozidlo, kde zdroji energie jsou baterie i pohonné látky, pohon představuje elektromotor a zároveň i spalovací motor. Nelze jej nabíjet, elektromotor získá energii jenom z brzdění, dojíždění a ze spalovacího motoru. Elektromotor pracuje i jako motor i jako generátor.

Následně byly vyvíjeny další typy elektrických vozidel jako např.:

Elektromobily s palivovým článkem – FCEV (*Fuell Cell Electric Vehicles*) – u tohoto vozidla jsou zdrojem energie palivové články, které spolupracují s bateriemi a pohon tvoří elektromotor.

V tabulce 1. je znázorněno rozdělení spalovacích motorů - ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*), hybridních vozidel (HEV), čistě elektrických vozidel (BEV) a elektromobilů s palivovým článkem (FCEV). Vyjmenované pohony jsou rozděleny podle zdrojů energie a hnacího pohonu.

Dále v tabulce 1. lze vidět, že hybridní vozidla jsou rozdělena na základě úrovně hybridizace (činnosti funkcí mezi spalovacím motorem a elektromotorem) na mikrohybridní – micro HEV, mírně hybridní - mild HEV a plně hybridní - full HEV. Toto dělení bylo ještě rozšířené s tzv. dobíjitelným hybridním vozidlem – PHEV (*plug-in hybrid electric vehicle*) a s hybridním vozidlem s prodlouženým dojezdem - REEV (*range-extended electric vehicle*).

Vysvětlení typů pohonů:

Plug-in hybrid - PHEV – jedná se o rozšíření plně hybridního pohonu s funkcí dobíjení. Obecně pracuje v smíšeném režimu, kde elektromotor a spalovací motor pracují společně tak, že spalovací motor udržuje efektivní provoz.

Hybridní vozidlo s prodlouženým dojezdem - REEV – je hybridní vozidlo (HEV) s malým motorem a generátorem pro nabíjení baterií. Obecně pracuje jenom v elektrickém režimu, dokud není baterie vyčerpaná do určeného prahu.

Tabulka 1. Rozdělení vozidel podle zdroje energie a typu pohonu [1]

Zdroj energie	Typ vozidla	Hnací pohon
Pohonné lát.	ICEV	Spalovací
benzín nafta	Micro HEV	motor
	Mild HEV	
	Full HEV	
	PHEV	
	REEV	
Baterie	BEV	Elektromotor
Vodík	FCEV	

1.1 Výhody a nevýhody elektrických vozidel

Elektrická vozidla mají značné výhody, jako příklad lze uvést nulové lokální emise (emise z výfuků) a minimální globální emise (emise z elektráren při výrobě elektrické energie). Dalšími pozitivy jsou snadné spouštění, tichý chod a jednoduchá konstrukce.

Na druhou stranu mezi velké nevýhody patří například omezená dojezdová vzdálenost, nedostatek rychlonabíjecích stanic a jejich cena.

Elektromobily s palivovým článkem (FCEV) mají stejné výhody jako elektrická vozidla (EV), ale jejich dojezdová vzdálenost je srovnatelná s vozidly se spalovacími motory.

Nevýhodou je nedostatek možností pro nabíjení vodíku a také jejich cena.

U vozidel typu mikrohybrid (microHEV) je odstraněn startovací motor a obvyklý generátor je nahrazen **integrováným startovacím generátorem – ISG** (*Integrated – Starter – Generator*).

Tento startovací generátor nabízí dvě následující vlastnosti hybridním vozidlům:

- možnost vypnutí motoru, dokud vozidlo není v pohybu (start-stop systém),
- možnost nabíjení baterie primárně během zpomalení vozidla brzděním, čímž poskytuje mírné množství regenerativního brzdění (rekuperační brzdění).

Pro plně hybridní vozidla je klíčovou technologií elektrická variabilní převodovka – EVT (*Electric Variable Transmission*), které hlavním úkolem je rozdělení energií. Tento systém nabízí všechny funkce hybridních vozidel a to elektrické startování, rekuperační brzdění, zmenšování motorů, start-stop systém.

2 ZDROJE ENERGIÍ PRO ELEKTRICKÉ VOZIDLÁ

Hlavním problémem u EV a HEV jsou prostředky pro akumulování elektrické energie. Elektrickou energii lze velice ekologicky získat, jednoduše přenést na velké vzdálenosti a lehko převést na jiný druh energie. Její nevýhodou je potřeba jejího skladování - akumulování. Pro akumulování elektrické energie jsou většinou používány elektrochemické zdroje energie. Jejich princip je založen na proměně chemické energie na energii elektrickou. Základním prvkem elektrochemických zdrojů energie jsou články. Článek má tři základní části: elektrody, elektrolyt a separátor. Za účelem zvýšení parametrů (napětí nebo proud) se články spojují.

Elektrochemické zdroje energie lze rozdělit do následujících hlavních skupin:

- primární články,
- sekundární (akumulátorové) články,
- palivové články.

Jednotlivé zdroje elektrické energie jsou vysvětleny v podkapitolách.

2.1 Akumulátor [7]

Sekundární články – akumulátory mají velkou výhodu vůči primárním článkům. Pomocí vnějšího elektrického proudu jich lze nabíjet, tzn. naakumulovat elektrickou energii znova. Počet cyklů vybití/nabití se pohybuje mezi stovkami až tisíci cykly.

Nejčastější typy sekundárních článků jsou:

- olověné akumulátory,
- akumulátory na bázi Ni-Cd, Ni-Zn, Ni-Fe,
- baterie na bázi Ni-MH,
- baterie Li-ion.

Olověný akumulátor

Jsou nejpoužívanějším sekundárním článkem. Jeho hlavními klady jsou nízká cena, spolehlivost, výkon a recyklovatelnost.

Hlavní části akumulátoru jsou elektrody, elektrolyt, separátor a nádoba.

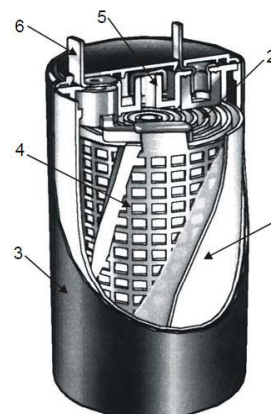
Tento akumulátor obsahuje dva druhy *elektrod* - kladnou a zápornou, které tvoří konstrukční část. Na nich jsou závislé elektrické, hmotnostní, rozměrové parametry a životnost celého článku. Dle konstrukce se rozděluje na mřížkové (nejběžnější, nejlehčí), spirálové, trubkové, tyčové a jiné.

Jako *elektrolyt* je používána kyselina sírová (H_2SO_4) a destilovaná voda, většinou jsou ve formě kapaliny. Když je akumulátor nabitý, tak koncentrace kyseliny se pohybuje kolem 28-40%, když je vybitý, tak kolem 12-24%. Jiné hodnoty koncentrace škodí akumulátoru.

Pro oddělení kladných a záporných elektrod a zabránění vzniku zkratu slouží *separátor*. Hlavní požadavky separátoru jsou velký elektrický odpor a umožňování maximálního průchodu iontů z elektrolytu. Vyrábí se plošný, obálkový z materiálů jako skelné vlákna, celulóza. Existují aj mikroporézní separátory, které mají vyšší životnost jako samotný akumulátor.

Pro ochranu všech vyjmenovaných součástí slouží *nádoba* akumulátoru. Chrání samostatný akumulátor od mechanických a chemických vlivů, ale chrání i vnější okolí od vlivu akumulátoru na ně, hlavně od kyseliny. Nádoby mají kalový a plynovací prostor. Na výrobu se většinou používají plasty.

Na obrázku 1. je zobrazena konstrukce akumulátoru se spirálovými elektrodami.



- 1 – separátor s absorbovaným elektrolytem,
- 2 – elektrody,
- 3 – pouzdro článku,
- 4 – nosná tenká mřížka elektrod,
- 5 – bezpečnostní přetlakový ventil,
- 6 – vývod elektrody.

Olověné akumulátory se dělí následovně:

Podle použití:

- startovací
- trakční
- staniční

Podle typu:

- konvenční
- s regulačním ventilem – VRLA
(*Valve Regulated Lead Acid batteries*)

Obrázek 1. Akumulátor se spirálovými elektrodami [7]

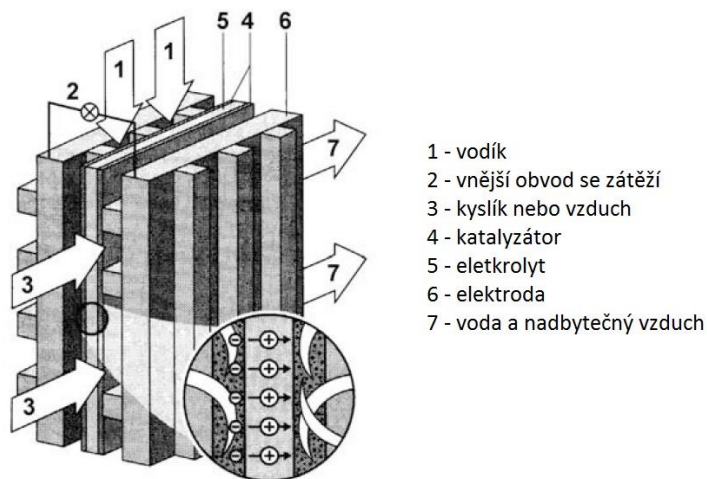
Akumulátory pro použití u EV a HEV mají velkou nevýhodu - to je jejich vysoká hmotnost a omezený počet cyklů nabíjení.

2.2 Palivový článek [3]

Tento zdroj energie se používá u elektromobilu s palivovým článkem typu FCEV. Palivové články jsou zařízení, kde dochází k přímé přeměně vnitřní energie paliva na elektrickou energii na základě elektromechanických procesů. Tento článek uvolní energii z vodíku tzv. „studenou“ formou. Toto zařízení na základě elektrochemických procesů přímo proměňuje vnitřní energii paliva na energii elektrickou. A to pomocí elektronického směšovacího systému, který určuje směšovací poměr vodíku a vzduchu. Ve spalovacím prostoru odnímá teplo přídavný vzduch a pomocí toho klesne teplota plamene pod kritickou mez, aby se nemohla směs sama vznítit. Při nízké teplotě spalování je zabráněn i vznik oxidů dusíku. Struktura palivového článku je zobrazena na obrázku 2. Palivový článek přebírá funkci konvenčního akumulátoru. Struktura elektrod závisí na použitém palivu a okysličovadlu. Palivem mohou být plynné (například: vodík, oxid uhličitý, hydrazin),

kapalné (metanol, složitější alkoholy) a tuhé látky (kovy Na, Mg, Zn, Cd).
 Okysličovadlo může také být různého skupenství a to plynného (kyslík, chlor)
 kapalného nebo tuhé (různé oxidy – HgO , MnO_2), ale nejčastěji se používá kyslík.
 Dle typu elektrolytu se palivové články dělí na:

- alkalické články – AFC (*Alkaline Fuel Cells*) – elektrolyt je zředěný hydroxid draselný KOH,
- články s tuhými polymery –PEFC (*Proton Exchange Fuel Cells*) – v nich je elektrolytem tuhý organický polymer,
- články s kyselinou fosforečnou – PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cells*) – elektrolytem je kyselina fosforečná HPO_3 ,
- články s roztavenými uhličitany – MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cells*) – elektrolyt je tvořen směsí roztavených uhličitánů,
- články s tuhými oxidy – SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*) – elektrolytem je oxid vybraného kovu.



Obrázek 2. Schéma palivového článku [3]

Různé typy palivových článků se liší chemickými reakcemi probíhajícími na elektrodách, provozní teplotou i účinností elektrochemických přeměn.

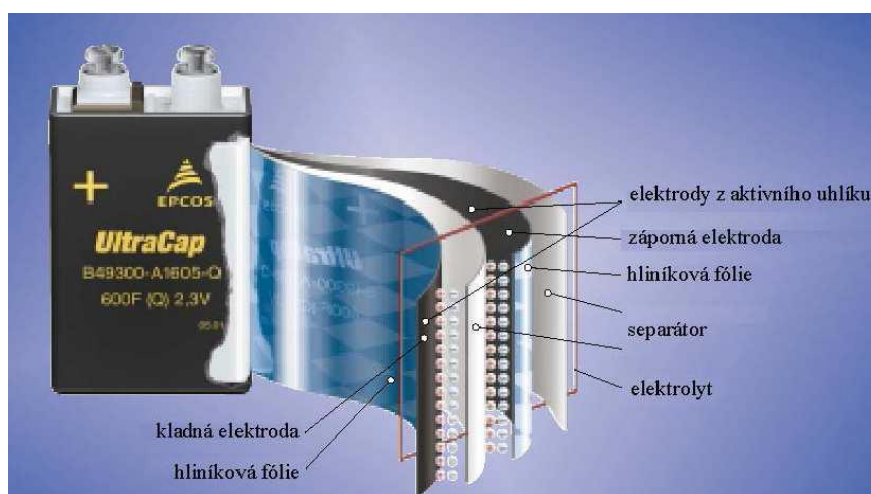
Vodíkové motory pracují prakticky bez emisí, emisní komponenty jsou sníženy o 99,9% oproti spalovacím motorům.

2.3 Superkondenzátor [9]

Kondenzátory ukládají energii na elektrostatickém principu. Ukládají elektrické náboje, proto není potřeba transformovat energii na jinou formu. Superkondenzátory, nazývané aj *ultrakapacitory* mají kapacitu řádově až 10^3 F. Jejich měrná energie je stonásobně vyšší než u klasických kondenzátorů.

2.3.1 Princip funkce [4] [15]

Superkondenzátor využívá efekt, který popsal K. Hemholtz. Po přiložení napětí na elektrody, které jsou ponořeny ve vodivé tekutině, se vytvoří elektrochemické dvojvrstvi. Když kondenzátor není nabitý, ionty jsou rozloženy rovnoměrně v elektrolytu mezi elektrodami. Po přiložení napětí se ionty začnou pohybovat k elektrodám (kladné ionty k záporné elektrodě a naopak). Takhle se vytvoří dvojvrstva na obou elektrodách se zrcadlovým rozložením náboje. Zobrazená struktura superkondenzátoru je na obrázku 3.



Obrázek 3. Struktura superkondenzátoru [15]

Elektrody jsou uhlíkové „plátky“, které jsou paralelně propojeny a ponořeny do organického a vysoce vodivého elektrolytu. Elektrody jsou odděleny například pomocí skleněných vláken, polymerů nebo papíru. Hliníkové fólie tvoří elektrické propojení mezi elektrodami.

Použitelnou energii uloženou v článku superkondenzátoru lze vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{1}{2} C U_{Cjm}^2 \frac{3/4}{3600} \quad (2.1)$$

kde	E – uložené energie	[Wh]
	C – kapacita článku	[F]
	U_{Cjm} – jmenovité napětí článku	[V]

Uvedená rovnice (2.1) předpokládá, že článek je vybitý mezi hodnotami jmenovitého napětí článku - U_{Cjm} a poloviční hodnotou jmenovitého napětí $1/2 \cdot U_{Cjm}$. Jmenovité napětí je maximum, co článek může použít. V praxi je článek testován obvykle u nižšího napětí než jmenovitého za účelem zjištění měrné energie článku (v jednotkách Wh/kg). Snížení napětí článku se provádí z důvodu maximalizace životního cyklu superkondenzátoru ve vozidle.

Maximální výkon superkondenzátoru dosahuje řádově až kW na kg hmotnosti článku. Výkon článku ultrakapacitoru se počítá ze vztahu:

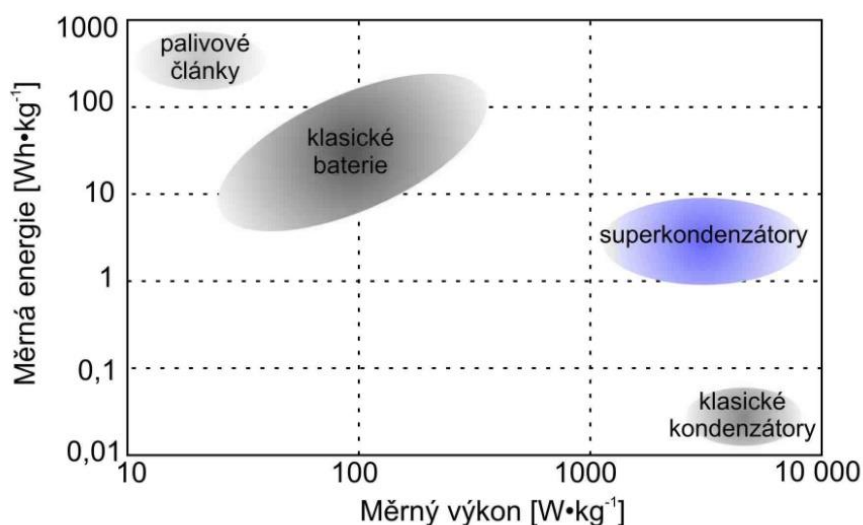
$$P_C = \frac{U_{Cjm}^2}{4R_C} \quad (2.2)$$

kde P_C - výkon článku superkondenzátoru [W]
 R_C – odpor článku [Ω]
 U_{Cjm} – jmenovité napětí článku [V]

Vztah (2.2) odpovídá 50%ní účinnosti článku, co není použitelná účinnost pro elektrické a hybridní vozidla. Více praktické jsou účinnosti 75-80%ní pro činnosti elektrického vozidla (napájen z baterie) a 90-95%ní pro činnosti hybridního vozidla. V obou případech je klíčem výkonné charakteristiky článku pro určení maximálního impulsního výkonu odpor článku R_C . Maximální použitelný výkon článku lze určit z *Ragonového diagramu* (zobrazuje závislost měrnou energií článku v jednotkách Wh/kg od měrného výkonu článku v jednotkách W/kg). Poloha zdrojů elektrické energie v Ragonovém diagramu je zobrazena na obrázku 4.

U superkondenzátoru jsou dalšími důležitými parametry *hmotnost* a *objem*.

Pro ultrakapacitory je hlavním problémem minimální energie nutná k provozu vozidla při reálné jízdě.



Obrázek 4. Přehled různých zdrojů energie z hlediska hodnoty měrné energie a měrného výkonu [5]

2.3.2 Technologie superkondenzátorů

Technologie pro výrobu výkonných ultrakapacitorů pro aplikace ve vozidlech jsou zobrazené v tabulce 2.

Tabulka 2. Technologie elektrolytických kondenzátorů s vysokou měrnou energií [4]

Typ technologie	Materiál elektrody	Mechanismus skladování energie	Napětí čl. [V]	Měr. energie [Wh/kg]	Měr. výkon [kW/kg]
Dvojvrstvý elektrolytický	aktivní uhlík	oddělení náboje	2,5-3	5-7	1-3
Pokročilý uhlíkový	grafitové uhlí	přesun náboje / vložení (interkalace)	3-3,5	8-12	1-2
Pokročilý uhlíkový	nano-trubice	oddělení náboje	2,5-3		
Pseudo-kondenzátor	oxidy kovů	redoxní přesun nábojů	2-3,5	10-15	1-2
Hybrid	uhlík / oxid kovu	dvojvrstvý / přesun náboje	2-3,3	10-15	1-2
Hybrid	uhlík / oxid olova	dvojvrstvý / výtěžek faradayův (faradaic)	1,5-2,2	10-12	1-2

Dvojvrstvý superkondenzátor

Většina elektrolytických kondenzátorů na trhu se nazývá **elektrické dvojvrstvé kondenzátory - EDLC** (*Electric Double-Layer Capacitors*). Uchování energie v elektrolytických kondenzátorech je výsledkem separace náboje v mikroskopicky tenkých vrstvách mezi pevným vodivým povrchem a kapalným elektrolytem obsahujícím ionty. Dominantním materiálem pro elektrody je mikropórovitý aktivní uhlík. Dvojvrstvy jsou vytvořené jako mikropóry na povrchu uhlíkového materiálu. Elektrolyt lze použít vodní i organický.

Měrná energie u dostupných uhlíkových zařízení, které používají organický elektrolyt, je 4-5 Wh/kg. Zlepšení měrné energie u uhlíkových zařízení závisí na vyvíjení uhlíků s vyšší kapacitou (150-200 F/gm) a elektrolytů, které jsou schopny vydržet vyšší napětí (3-3,5 V). Tyto vylepšení materiálů mají za následek zvýšení měrné energie až nad hodnotu 10 Wh/kg. Klíčovým faktorem pro dosažení vyšší výkonu článku P_C je snížení elektrického odporu článku R_C . Možnost zvýšit měrný výkon zvýšením kapacitancí uhlíku umožňuje použití tenčí vrstvy uhlíku na elektrodách.

Pseudo-kondenzátory

Pokud se ionty v EDLC kondenzátorů přemístí na povrch elektrod a spojí se s atomy na povrchu, dochází k mechanismu nazývanému „pseudo-kapacita“. Pro elektrody v pseudo-kondenzátorech jsou vhodné oxidy kovů. Kapacita materiálů elektrod je výrazně vyšší než kapacita mikropórovitého uhlíku. Zatím však nebyly testovány na vyšší hodnotu měrné energie než 10 Wh/kg, na měrný výkon vyšší než 2000 W/kg a jejich maximální počet životních cyklů je omezen na hodnotu 200 000.

Hybridní (asymetrické) kondenzátory

Jsou to kondenzátory, ve kterých je jedna z elektrod z mikropórovitého uhlíku a druhá z materiálů s pseudo-kapacitou, nebo z faradayových materiálů, které jsou používány i v akumulátorech. Tyto kondenzátory jsou uváděny i jako asymetrické.

2.3.3 Propojení a použití [15]

Výsledný blok superkondenzátoru se skládá z článků, které jsou spojeny v sérii i paralelně jako u baterií. Při sériovém řazení je potřeba dávat pozor na to, že napětí na celém spojení (všech článků) se rozdělí dle velikosti kapacity jednotlivých článků. Když mají články stejnou kapacitu, tak celkové napětí se rozdělí rovnoměrně, ale když ne, tak na články s vyšší kapacitou jsou nabity na nižší napětí a opačně. Napětí na článku je ovlivněno také zbytkovým proudem na elektrických prvcích a může způsobit, že napětí na jednotlivých člancích přesáhne dovolené pracovní napětí (mezi 2,5-3V). Toto může vést k zničení jednotlivých článků. Zbytkové proudy u kondenzátoru jsou ošetřeny buď pomocí paralelních rezistorů, nebo se spínají s proměnným odporem.

Ve většině případů je počet článků v modulu kombinovaných tak, aby bylo možné superkondenzátorový blok jednoduše montovat do vozidla.

3 ELEKTRICKÉ MOTORY V ELEKTRICKÝCH VOZIDLECH [1]

Elektrické motory tvoří základ technologie elektrických vozidel. Z tohoto důvodu jsou obecné požadavky na elektrické motory pro elektromobily mnohem přísnější než pro běžné aplikace. Některé z těchto požadavek jsou:

- vysoký krouticí moment,
- vysoký výkon,
- široký rozsah otáček,
- vysoká účinnost přes šířku rozsahu točivého momentu a rozsahu rychlosti,
- široký rozsah konstantního výkonu,
- velký krouticí moment pro startování a náročné stoupání v jízdě,
- schopnost vysokého střídavého přetížení pro předjíždění,
- vysoká spolehlivost a robustnost pro automobilové prostředí,
- tichost.
- rozumná cena.

Pokud elektromotor musí spolupracovat se spalovacím motorem v různých typech hybridních vozidel, tak musí splňovat i další požadavky:

- vysokou účinnost generátoru přes celý rychlostní rozsah,
- dobré napěťové regulace,
- možnost sjednocení se se spalovacím motorem.

Hlavní motory, které lze aplikovat pro elektromobily (EV) a hybridní elektromobily (HEV), jsou:

- stejnosměrný motor,
- asynchronní motor,
- synchronní motor,
- synchronní motor s permanentním magnetem.

3.1 Stejnosměrný motor

Je to historicky nejstarší motor, který je napájen stejnosměrným proudem.

Rozděluje se dle způsobů buzení magnetického pole na:

- stejnosměrné (ss) motory s vlastním buzením,
- stejnosměrné motory s cizím buzením.

Následně je jej možné dělit dle spojení budícího vinutí a kotvy na:

- paralelní spojení,
- sériové spojení,
- s permanentním magnetem.

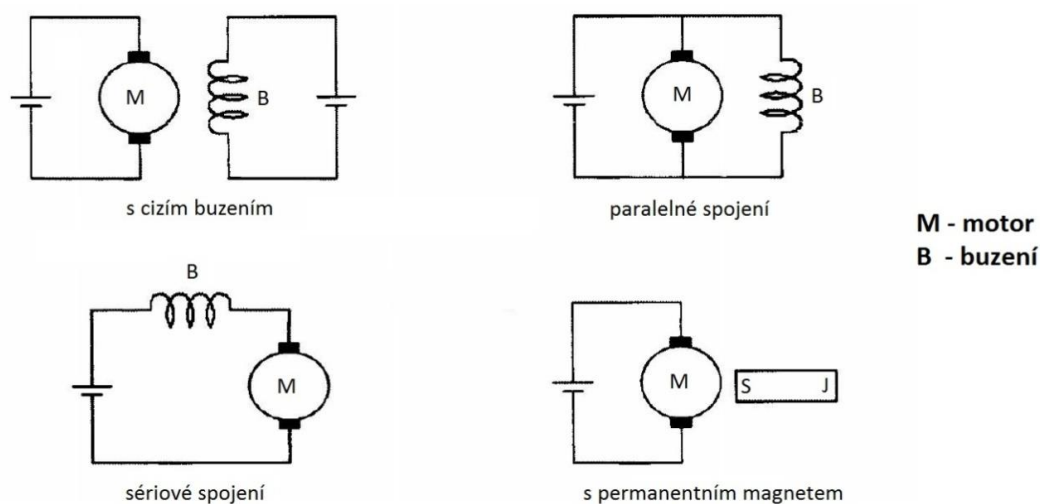
Na obrázku 5. jsou znázorněny způsoby zapojení vyjmenovaných druhů stejnosměrných motorů.

Pro *stejnosemřný motor s cizím buzením* je možné nezávisle řídit napětí na kotvě a na buzení (Obrázek 5. vlevo hoře). V tomto případě je závislost momentu motoru na rychlosti otáček záporná.

U *stejnosemřného motoru paralelně spojeného s buzením* je stejné napětí na kotvě i na buzení motoru (viz Obrázek 5. vpravo hoře). Momentová charakteristika je podobná charakteristice stejnosemřného motoru s cizím buzením.

U *stejnosemřných motorů spojeného sériově s buzením* stejný proud prochází kotvou i budícím vynutím motoru (Obrázek 5. vlevo dole). V tomto případě průběh momentu i rychlosti otáček závisí na proudu, avšak kým moment s rostoucím proudem roste, křivka znázorňující rychlost s rostoucím proudem klesá.

U *stejnosemřných motorů s permanentním magnetem* je magnetické pole neřízené (Obrázek 5. vpravo dole). Průběhy momentu a rychlosti jsou podobné jako u stejnosemřných motorů se sériovým buzením. Toto zapojení má vyšší výkonovou hustotu a vyšší efektivitu kvůli výhodám permanentního magnetu (absence ztrát magnetického pole).



Obrázek 5. Typy zapojení stejnosemřných motorů [1]

Všechny typy stejnosemřných motorů mají stejnou nevýhodu, kterou je opotřebení komutátorů a kartáčů. Komutátor způsobuje vlnění momentu a limituje rychlost motoru, kartáče jsou zodpovědné za tření a rádio-frekvenční rušení. Výhodou stejnosemřných motorů je jednoduchost. Jednoduché řízení zabezpečuje magnetický tok Φ a proud protékající kotvou I , pomocí kterých lze řídit moment motoru M , viz následující vzorec (3.1). Avšak kvůli relativně nízké efektivitě a potřebě údržby kvůli opotřebení se stejnosemřné motory neuplatňují pro elektrické a hybridní vozidla.

$$M_m = C_m \Phi \cdot I_k \quad (3.1)$$

kde	M_m – kroutící moment motoru	[Nm]
	C_m – konstanta elektromotorického napětí – EMF (<i>Electromotive force constant</i>)	[-]
	Φ – magnetický tok	[Wb]
	I_k – proud protékající kotvou	[A]

3.2 Asynchronní motor

U asynchronních motorů je tok taky přiváděný do statoru budícím vinutím, ale pomocí střídavého napětí (proměnlivá amplituda a frekvence napětí).

Existují dva typy asynchronních motorů, které jsou odlišeny dle typu kotvy:

- s kroužkovou kotvou (vinutá),
- s kotvou nakrátko.

Asynchronní motory nemají komutátor a kartáče, jsou bezúdržbové, levnější a odolnější. Jejich nevýhodou je složitější řízení kvůli nelinearitám dynamického modelu. Možnosti řízení asynchronních motorů jsou např.:

- pomocí frekvenčního měniče - VVVF (*Variable-Voltage Variable-Frequency*),
- vektorově orientované řízení – FOC (*Field-Oriented Control*).

Ovládání VVVF je založeno na řízení konstantního poměru napětí a frekvence (V/Hz) pro frekvence nižší než jmenovité. Zatímco pro kmitočty vyšší než jmenovité je řízení pomocí změny kmitočtů se stálým jmenovitým napětím. Kvůli pomalým reakcím je řízení VVVF nevhodné pro vysokovýkonné operace u elektromobilů.

Vektorové řízení vychází z modelu popisujícího elektromagnetické i elektromechanické jevy ve stroji. Prostorové vektory veličin v modelu stroje jsou transformovány do souřadnicového systému svázaného s prostorovým vektorem rotorového magnetického toku (souřadnicový systém dq). V řídicí struktuře se v ustáleném stavu jeví zadávané hodnoty jako stejnosměrné. Řízení FOC z hlediska ovládání umožní prohlížet na asynchronní motor jako na stejnosměrný motor s cizím buzením. Proto pomocí vektorově orientovaného řízení lze efektivně ovládat otáčky s rychlou přechodovou odezvou.

Asynchronní stroje řízené na principu FOC pomocí mikrokontrolérů jsou široce používány pro elektromobily a hybridní vozidla.

3.3 Synchronní motor

Synchronní motory mají výhody jako například jednoduché konstrukce, malé náklady pro výrobu a dobrou momentovou charakteristiku v závislosti na otáčkách.

Zde jsou popsány následující významné funkce:

- směr kroutícího momentu motoru je nezávislý na polaritě proudu,
- kroutící moment se produkuje jenom, když magnetické indukce v motoru roste. Pokud klesá magnetická indukce, motor má záporný moment (brzdící).

Každá fáze motoru vyrábí kladný krouticí moment jenom v polovině pólových rozteče motoru, co způsobuje vlnění kroutícího momentu. Objevuje se také problém s hlučností. Synchronní motory mají dva základní pracovní režimy.

- Když rychlost otáčení rotoru je menší než jmenovitý otáčky, tak proud lze omezit pomocí vlnění/přepínání – CCC (*Current Chopping Control*). Momentová charakteristika je řízena pomocí změny proudu. Během vysokorychlostních činností je proud omezen zpětným elektromotorickým napětím na fázích vinutí (odbuzování).
- Dalším typem řízení je řízení typu APC (*Angular Position Control*). Funguje na základě spínání fáze v okamžicích vztažených k poloze rotoru. V tomto režimu lze dosáhnout konstantní výkonové charakteristiky.

Lze říci, že synchronní motor má základní nedostatky, které brání jejich aplikování v elektrických a hybridních vozidlech, např. relativně nízká výkonovou hustotu, nelineární řízení a hlučnost. Po letech je jejich aplikování omezené.

3.4 Synchrony motor s permanentním magnetem

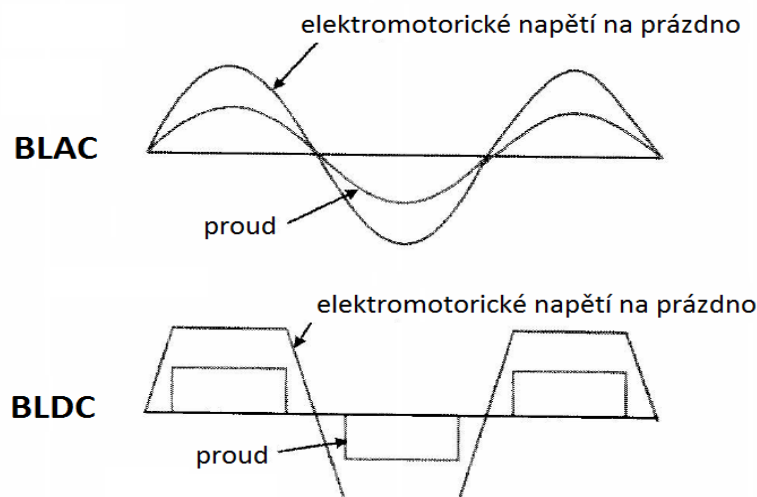
Synchronní motor s permanentním magnetem je výhodný pro aplikace s elektrickými a hybridními vozidly. Zde jsou některé výhody těchto motorů:

- Magnetické pole je zabezpečeno permanentním magnetem, hmotnost a objem lze snížit pro daný výkon, což způsobuje vysokou výkonovou hustotu.
- Má vysokou efektivitu kvůli nepřítomnosti ztrát mědi v rotoru, jelikož teplo vzniká hlavně ve statoru, lze jej snadněji odvádět do okolí.
- Rotor motoru má malou elektromechanickou časovou konstantu (rychlejší odezvy na řízení rychlosti).

Hlavními nevýhodami těchto motorů jsou vysoká cena permanentních magnetů a neřiditelnost magnetického toku.

Synchronní motory s permanentním magnetem (PM) lze dělit dle průběhu napájecího proudu na synchronní motory s PM napájen se střídavým proudem sinusového průběhu - BLAC (*Brushless AC motor*) a na synchronní motory s PM napájen se střídavým proudem obdélníkového průběhu - BLDC (*Brushless DC motor*). Průběhy napájecích proudů u BLAC a BLDC jsou na obrázku 6.

Působení mezi lichoběžníkovým průběhem elektromotorického napětí motoru a obdélníkovým průběhem proudu produkuje vyšší moment jako u sinusových průběhů.



Obrázek 6. Způsoby napájení synchronního motoru s PM [1]

Motory typu BLDC mají vyšší výkonovou hustotu než motory typu BLAC. Moment motoru BLDC významně pulzuje a motor typu BLAC vyrábí konstantní okamžitý moment nazýván i hladký moment.

Na základě pozicí permanentního magnetu v rotoru se synchronní stroje dělí:

- PM je montován na povrch rotoru pomocí epoxidového lepidla,
- PM je v rámci povrchu rotoru,
- PM je zmagnetizován radiálně a je v rotoru,
- PM je zmagnetizován po obvodu a je vnořen do rotoru.

3.5 Porovnávání motorů pro elektrická vozidla

Pro posouzení vhodnosti vyjmenovaných strojů, sloužících pro elektromobily a hybridní vozidla, jsou porovnány jejich vlastnosti (viz Tabulka 3.). Hodnota 1 představuje nejhorší a hodnota 5 nejlepší označení.

Tabulka 3. Porovnávání strojů pro elektrické a hybridní vozidlo [1]

	DC	Asynchronní	Synchronní	Syn s PM	BLDC
Výk. Hustota	2	3	3,5	4,5	5
Efektivita	2	3	3,5	4,5	5
Ovladatelnost	5	4	3	4	4
Spolehlivost	3	5	5	4	4
Splatnost	5	5	4	5	4
Cena	4	5	4	3	3
Hlučnost	3	5	2	5	5
Údržba	1	5	5	5	5

Nevýhodou u stejnosměrných strojů je potřeba pravidelné údržby, u synchronních strojů je vysoká hlučnost.

Výhodou asynchronních strojů je nízká cena a u bezkartáčových (střídavých) synchronních strojů s permanentním magnetem je předností vysoká hustota výkonu a efektivita.

Z hodnocení vyplývá, že bezkomutátorové stroje jsou výhodnější. Synchronní motor typu PM BLDC má lepší výkon než klasický synchronní PM motor. V současnosti jsou aplikace asynchronních strojů a synchronních s PM téměř rovnoměrně rozděleny na trhu elektrických a hybridních vozidel. Aplikace pro synchronní stroje jsou méně používány a pro stejnosměrné stroje jsou buď zastaralé, nebo limitované.

Kvůli zvyšujícím se nárokům na ochranu přírody a vysokou energetickou efektivitu jsou čím dál, tím méně používány asynchronní stroje a více používány PM BLDC stroje.

3.6 Pokročilé synchronní motory s PM [1]

Vývoj nových typů motorů pro aplikace u elektrických a hybridních vozidel se soustřeďuje na bezkomutátorové PM motory a na bezkartáčové (*brushless*). Speciálně na statorové PM stroje (magnet a závity jsou v statoru) a na stroje s proměnlivým magnetickým odporem - VR PM (*Variable Reluctance PM machines*).

3.6.1 Statorové PM motory

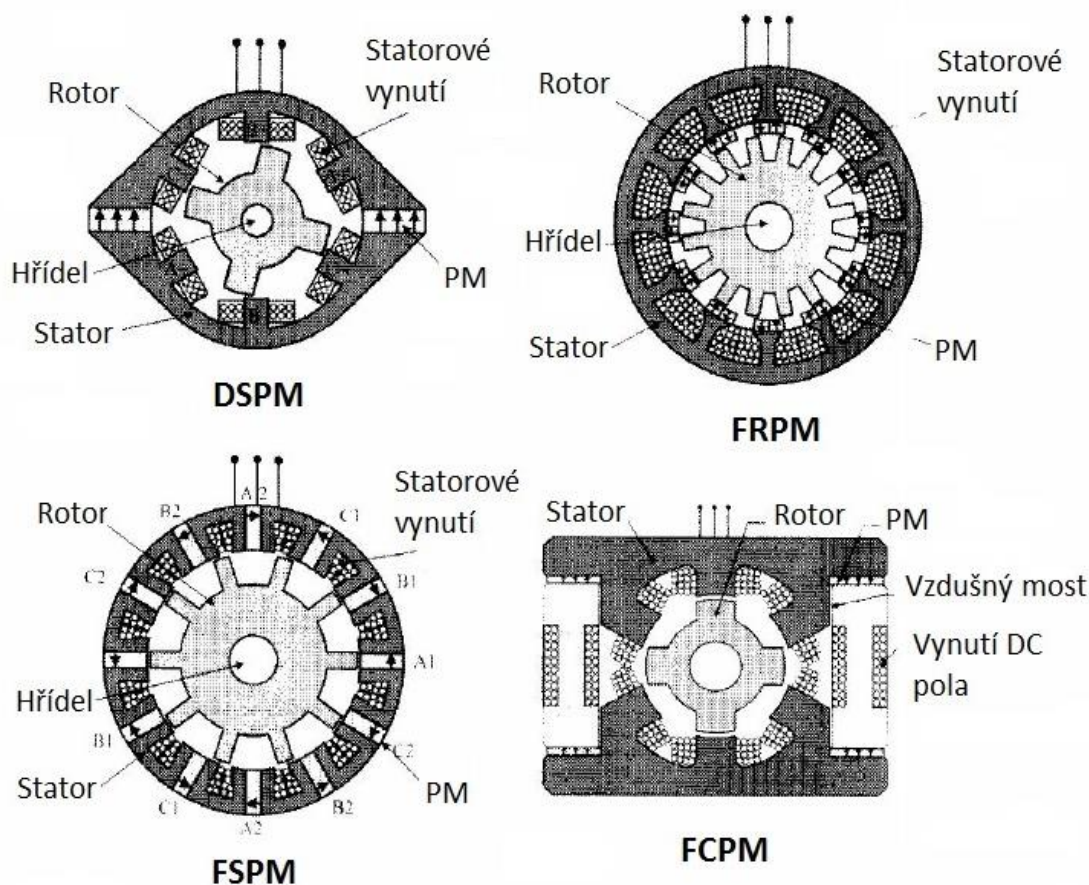
U statorových PM motorů je permanentní magnet umístěn ve statoru. Jelikož rotor nemá ani permanentní magnet ani vinutí, je tento typ strojů jednoduchý a robustní, a proto velmi vhodný pro aplikace ve vozidlech. Dle polohy PM ve statoru dělíme statorové PM motory na:

- DSPM (*Doubly Salient PM machines*),
- FRPM (*Flux-Reversal PM machines*),
- FSPM (*Flux-switching PM machines*),
- FCPM (*Flux-Controllable PM machines*).

Rozdíly v topologii statorových PM motorů je zobrazeno na obrázku 7.

DSPM motory jsou nejvíce rozvinuty z vyjmenovaných typů statorových PM strojů. I když DSPM má charakteristické póly v statoru i rotoru, výrazně dominuje kroutící moment vyvolaný magnetickým odporem, proto se zde projevuje nízká nerovnoměrnost momentu motoru. Změna magnetického toku dosažená propojením cívek způsobuje unipolární točení rotoru, což je výhodnější pro BLDC operace (viz Obrázek 6.). Změna toku ve vzduchové mezeři DSPM strojů je indukována hlavně změnou magnetické vodivosti. Pro generování jednosměrného kroutícího momentu motoru je používán bipolární proud kotvy. Kladný proud je používán, kým se tok zvyšuje, a záporný proud, kým tok klesá. Výsledkem je, že moment PM tvoří dominantní část kroutícího momentu, a moment magnetického odporu tvoří parazitní část momentu. Činnost

DSPM strojů je rozdílná od synchronního stroje, ve kterém unipolární proud kotvy vytváří moment magnetického odporu jenom v případě rostoucí indukčnosti. Hustota momentu u DSPM strojů je v podstatě vyšší než u synchronních strojů.



Obrázek 7. Topologií statorových PM motorů [1]

FRPM motory vykazují funkce změny bipolárního toku (tok spojitých cívek na statoru), protože tok s každou cívkou obrátí polaritu dle toho, jak se rotor otáčí. Ke každému statorovému zubu patří dva permanentní magnety s různou polaritou, které jsou namontovány na obou stranách daného zubu. Kým změny bipolárního toku mají lepší využití pro železné jádro než unipolární protějšek, FRPM stroje nabízí větší hustotu momentu než DSPM stroje. Avšak pokud jsou permanentní magnety připojeny na povrch statorových zubů, jsou více náchylné k částečné demagnetizaci, tím mohou mít za následek i významné ztráty kvůli vířivým proudům.

U **FSPM motory** každý zub statoru se skládá ze dvou sousedních laminovaných segmentů a permanentních magnetů. Každý z těchto segmentů je obložen dvěma obvodově magnetizovaným PM. Z tohoto důvodu FSPM motor umožňuje soustředit se na magnetický tok. Navíc FSPM stroje s možností přepínání magnetického toku mají odolnější výztuž, a proto nabízí vyšší elektrické zatížení. Jelikož jeho zpětné elektromagnetické pole má podstatně sinusový průběh, tyto stroje jsou více vhodné na BLAC operace (viz Obrázek 6.).

Statorové PM motory typu FCPM

Obecně statorové PM motory mají obtížné řízení magnetického toku ve vzduchové mezeře. Činnosti s konstantním výkonným rozsahem jsou limitované, proto některé operace jako optimalizace efektivnosti nebo posílení toku nelze dosáhnout. Jedním ze základních typů FCPM motorů je DSPM motor s hybridním polem (Obrázek 7. vpravo dole). Stator motoru zahrnuje dva typy vinutí, trojfázové vinutí kotvy, stejnosměrného budící vinutí a póly permanentních magnetů. Rotor nemá permanentní magnet ani vinutí, proto nabízí vysokou mechanickou pevnost. U činností s třífázovým vinutím kotvy, jako u DSPM motorů, stejnosměrné pole vinutí pracuje i jako elektromagnet i jako nástroj pro řízení magnetického toku statoru. Když budící vinutí magnetomotorické síly – MMF (*Magnetomotive force*) posiluje magnetomotorickou sílu permanentního magnetu, dodatečný tok pomáhá posílit účinek magnetického toku statoru. Na druhé straně, když budící vinutí magnetomotorické síly je opačné jako MMF permanentního magnetu, tak dodatečný tok podporuje unikání magnetického toku PM, proto se zesílení účinnosti celkového toku oslabí.

Zde jsou vyjmenovány výhody:

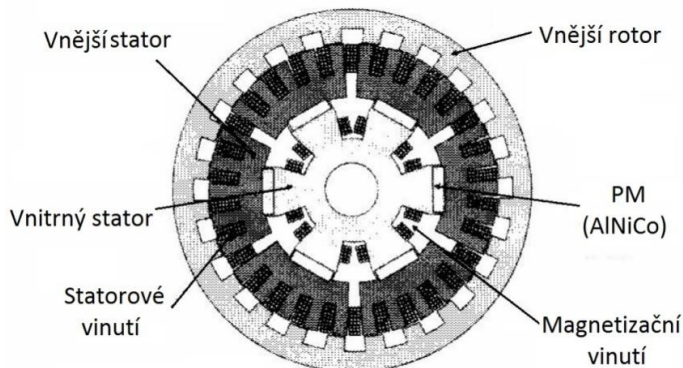
- změnou polarity a velikosti proudu stejnosměrného budícího vinutí lze snadněji řídit hustotu magnetického toku ve vzduchové mezeře,
- se zesílením magnetického toku může motor nabídnout mimořádně vysoký točivý moment, což je velmi podstatné pro start u elektrických vozidel, u studeného startování u hybridních vozidel, nebo také pomáhá při předjíždění a jízdě do kopce,
- s oslabením magnetického toku motoru nabízí širší charakteristiku rozsahu otáček a konstantního výkonu, což je výhodné pro jízdu na delší tratě u elektrických vozidel,
- pomocí ladění hustoty magnetického toku ve vzduchové mezeře motor může udržovat konstantní napěťový výstup během generování anebo regenerace v širokém rozsahu otáček, což je výhodné pro nabíjení baterií u hybridních vozidel,
- pomocí ladění hustoty magnetického toku ve vzduchové mezeře lze efektivněji řídit motor anebo minimalizovat vlnění kroutícího momentu, což je velmi žádoucí pro elektrická vozidla.

Tato topologie motoru dává jednoznačné výhody ve vysoké mechanické integritě a v pružném řízení magnetického toku ve vzduchové mezeře, které jsou žádoucí pro EV a HEV vozidla. Jejich stator je poměrně objemný a má významný únik magnetického toku.

Vylepšené verze lze aplikovat *topologií vnějšího rotoru*. Tato topologie umožňuje plné využití prostoru uvnitř statoru pro přizpůsobení permanentního magnetu i stejnosměrného budícího vinutí, a proto zvyšuje hustotu výkonu. Také dokud PM i DC budící

vinutí jsou zahrnuté v rotoru, problém s únikem magnetického toku lze minimalizovat. Motory typu DSPM s hybridním buzením mají hlavní nevýhodu v tom, že neustálé buzení pomocí stejnosměrného budícího vinutí pro řízení magnetického toku výrazně zvýší ztrátu mědi, a tím se následně zhoršuje účinnost.

Nedávno, byly přijaty návrhy motoru s PM s pamětí anebo motory s PM s mnemotechnickými vlastnostmi magnetického toku (s metodou zapamatování), které mají schopnosti změnit intenzitu magnetizací a zapamatování si úrovní hustoty magnetického toku v PM. Jejich nevýhodou je složitější řízení proudu v kotvě pro magnetizace PM a s možností náhodné demagnetizace jako reakce kotvy hlavně při rekuperačním brzdění. Začleněním návrhu PM motoru s pamětí do topologie DSPM motoru s hybridním buzením s vnějším rotorem je vyřešena paměť DSPM motoru, co nabízí účinné a efektivní řízení magnetického toku ve vzduchové mezeře. Vysokou efektivitu zabezpečuje přímo magnetizace PM pomocí magnetizačního vinutí, zatímco vysokou účinnost zabezpečuje používání dočasného proudového impulzu pro magnetizace. Sestava DSPM motoru s pamětí a vnějším rotorem je zobrazena na obrázku 8. DSPM motory s pamětí poskytují všechny provozní funkce DSPM motoru s hybridním buzením a to hlavně zesílení, zeslabení a optimalizace magnetického toku. Nutná spotřeba energie pro magnetizace a demagnetizace PM je dočasná a zanedbatelná ve srovnání se spotřebou energie pro neustálé (kontinuální) hybridní buzení.



Obrázek 8. Topologie DSPM motoru s pamětí a vnějším rotorem [1]

3.6.2 VR PM motory

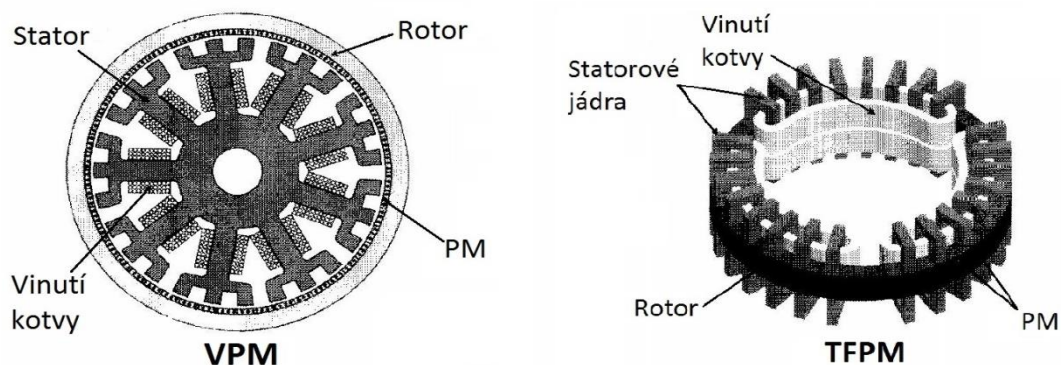
VR PM motory je třída PM motorů s účelem dosáhnout nízké otáčky s vysokým kroutícím momentem přímo pro aplikování u pohonů. Princip funkčnosti lze vysvětlit tak, že magnetický tok spojený s vinutím kotvy se mění se spolu s interakcí mezi permanentními magnety a souborem zubů motoru. Obecně jsou pole buzené statorovým vinutím a permanentní magnety rotoru odlišné. Na základě funkce modulační ozubené struktury *heteropolárního pole* (pole s odlišnou polaritou) mohou vzájemně působit a

rozvíjet stálý točivý moment. VR PM motory lze rozdělit na *Vernier PM motory* - VPM a na *TFRM motory*.

VPM motory se vyznačují statorovou konfigurací ozubené tyče. Malý pohyb rotoru může způsobit velkou změnu magnetického toku, co vyvolá vysoký krouticí moment. To je tzv. *magnetický efekt ozubeného kola* (magnetic gearing effect). Existují dva typy topologie s *rozděleným pólem* (split-pole) a *typ s otevřenou štěrbinou* (open-slot). Dřívější typ je vhodný pro řízení s vysokým rozlišením vzhledem k jeho velkému počtu zubů. Druhý typ má více prostoru pro cívky a je vhodnější pro vysokovýkonné aplikace. Na obrázku 9. vlevo je zobrazený motor typu VPM s topologií typu dělené póly. Na zobrazené topologii (Obrázek 9. vlevo) lze vidět, že každý zub statoru je rozdělený na tři menší zuby na konci, toto dělení se označuje FMPs (Flux-Modulation Poles). Toto FMPs uspořádání statoru umožňuje přijmout kompaktní vinutí kotvy, které dovolí, že rozteč mezi cívky se rovná rozteču mezi sloty. To může minimalizovat konce vinutí, a proto uspoří měď a sníží ztráty v mědi. Permanentní magnety jsou zmagnetizované radiálně a následně montovány na povrch rotoru.

V důsledku toho pole buzené statorovým vinutím a permanentními magnety rotoru s rozlišnými pólovými dvojicemi mohou na sebe vzájemně působit. Uspořádání s vnějším rotorem se provádí s velkým průměrem, aby bylo umožněno vložit větší počet pólů PM tak, aby byl plně využitý prostor ve statoru pro vinutí kotvy. Kromě toho jsou tyto motory s nízkými otáčkami a vysokým krouticím momentem lákavé pro elektromobily a to kvůli eliminaci mechanické převodovky a zlepšení mechanické integrity.

TFRM motory se vyznačují sestavou statoru a obloženého rotoru s PM. Mají vysokou hustotu kroutícího momentu pro aplikace přímé jízdy. Na základě orientace permanentních magnetů lze rozdělit TFRM motory na typy s magnetem na povrchu a koncentrované na magnetický tok. U typů s magnetem na povrchu jsou PM zmagnetizované v směru osy (axiálním směru) a kolmo na směr otáčení.



Obrázek 9. Topologie motoru VPM a TFRM [1]

Permanentní magnety druhého typu jsou magnetizovány ve směru tečny (tangenciální směr) a paralelně ke směru otáčení. Typy motorů s koncentrováním na magnetický tok mají vyšší hustotu krouticího momentu jako typy motorů, kde jsou magnety na povrchu. Proto jsou zejména lákavé pro typy jízdy *in wheel* (in-wheel drive), i když mají mechanicky obtížné konstrukce. Motory typu TFPM lze sestavit satorovým jádrem tvaru U nebo C. Motory se satorovým jádrem typu U obsahují mnoho součástí, což způsobuje složitou strukturu a obtížnou výrobu. Zatím satorové jádro s tvarem C má výhodu v jednoduché struktuře a poskytuje větší prostor pro vinutí kotvy, což vede k dalšímu možnému zvýšení elektrického zatížení, a proto i hustotě krouticího momentu. TFPM motor se satorem typu C je zobrazen na obrázku 9. vpravo. Kým magnetický tok vede přes satory vždy kolmo (ortogonálně) na proud ve vinutí kotvy, magnetické zatížení je úplně oddělené od elektrického zatížení. Hustota krouticího momentu u TFPM motoru je lepší než u ostatních typů PM motorů. Avšak dráha magnetického toku je trojrozměrná, odpovídající konstrukce a struktura je komplikovaná, což vede k obtížnostem a vyšším nákladům ve výrobě. Také odpovídající elektromagnetické analýzy zahrnují zdoluhavé numerické výpočty a vzhledem k úniku magnetického toku, mají TFPM motory proto velmi nízký účinník.

3.6.3 Porovnání pokročilých synchronních motorů s PM

Od doby kdy jsou výše uvedené pokročilé motory vyvíjeny pro EV a HEV aplikace, ještě nebyl odhalen jejich úplný výkon. Přesto jsou v tabulce 4. porovnány typy pokročilých synchronních motorů dle jejich vlastností a vhodnosti pro elektromobily a hybridní vozidla.

Tabulka 4. Porovnávání vlastností pokročilých motorů pro elektrické a hybridní stroje [1]

	DSPM	FRPM	FSPM	FCPM	VPM	TFPM
Výk. hustota	průměrný	dobry	dobry	dobry	dobry	výborný
Hustota momen.	průměrný	dobry	dobry	dobry	výborný	výborný
Efektivita	dobry	dobry	dobry	výborný	průměrný	průměrný
Řiditelnost	průměrný	průměrný	dobry	výborný	dobry	dobry
Odolnost PM	průměrný	slabý	dobry	průměrný	průměrný	průměrný
Robustnost	silný	průměrný	průměrný	průměrný	průměrný	slabý
Výroba	snadný	průměrný	průměrný	náročný	průměrný	náročný
Vyspělost	vysoký	průměrný	průměrný	nízký	nízký	průměrný

Dle hustoty výkonu a krouticího momentu je nejlepší motor typu TFPM, kvůli vlastnímu kompaktnímu návrhu. Motor typu VPM má nejlepší vlastnosti dle hustoty krouticího momentu kvůli nabízení i nízko otáčkových operací. Vzhledem k efektivitě motoru typu FCPM je relativně nejlepší díky schopnosti řízení magnetického toku pro optimalizaci účinnosti, protože motory VPM a TFPM mají problémy se ztrátami v mědi (vzhledem k jejich nízkým účinníkům). Motory typu

FCPM, jelikož obsahují i hybridní pole i permanentní magnety s pamětí, nabízejí vynikající říditelnosti magnetického toku. Vlastnost, týkající se demagnetizace permanentních magnetů u FRPM motorů, je relativně slabá, protože permanentní magnety jsou namontované na povrchu statorových zubů a jsou náchylnější na částečné a nevratné demagnetizace. Oproti tomu motory typu FSPM mají permanentní magnety polohované tak, že vliv reakčního pole kotvy na pracovní bod magnetů je minimální, čili mají dobrou odolnost vůči demagnetizaci. Vzhledem k mechanické robustnosti je motor typu DSPM relativně nejlepší i kvůli své jednoduché struktuře. TFPM motory mají komplikovanou strukturu trojrozměrného magnetického toku.

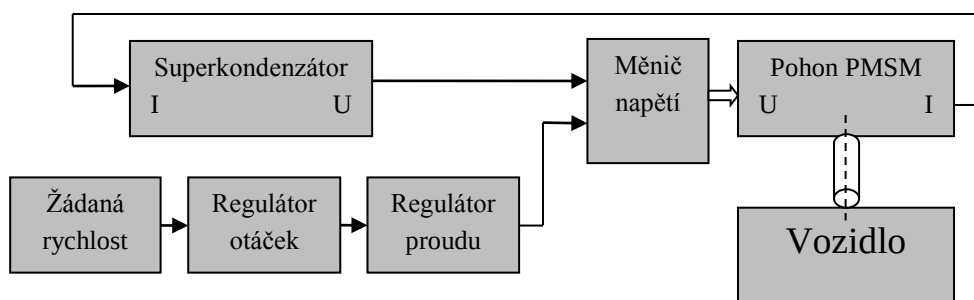
Snadnost výroby se zakládá hlavně na složitosti struktury s ohleduplností na složitosti řízení. Proto nejsnadnější na výrobu je motor typu DSPM a nejnáročnější jsou FCPM a TFPM motory. Z hlediska poslední vlastnosti je relativně nejvíc zralý typ motoru je DSPM motor a nejméně vyvinuté jsou motory FCPM a VPM.

Všechny tyto moderní motory mají své klady a zápory. Důležitosti jejich výhod a nevýhod se liší na základě jejich použití pro EV a HEV aplikace. Například DSPM motory se snadno aplikují pro elektromobily i hybridní vozidla, protože jsou relativně nejvyspělejší. Motory typu FSPM jsou přitažlivé pro krátkodobé aplikace kvůli jejich všestranným výkonům. Motory typu FCPM jsou vhodné pro ty vysokovýkonné elektromobily, které potřebují široký rozsah konstantního provozního výkonu. Tenhle typ motorů je výhodný také pro ty vysokovýkonné hybridní vozidla, kde integrovaný startovací generátor (ISG) potřebuje vysoký startovací kroutící moment pro startování motoru a generování konstantního napětí v širokém rozsahu otáček.

4 MODELOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH PRVKŮ

V této kapitole jsou popsány a vytvořeny jednotlivé modely pro simulace. Jako zdrojem energie pro vozidlo byl vybrán prvek superkondenzátor, který je popsán kapitole 2.3. Jelikož se v elektromobilech preferuje používání bezkomutátorových motorů (synchronní a asynchronní) byl z toho důvodu na modelování elektrického pohonu zvolen synchronní motor s permanentním magnetem (PMSM). Synchronní motor má vyšší točivý moment a účinnost jako asynchronní motor a menší náklady na chlazení.

Vozidlo v modelu je představováno pomocí zátěžového momentu na motoru PMSM. Pohon s vozidlem je spojen pomocí hřídele přes převodovku. Pro řízení rychlosti vozidla byly vytvořeny modely regulátorů otáček a proudu. Výsledný model obsahuje i bloky pro omezení napětí a proudu a napěťový měnič. Zjednodušené blokové schéma celého modelu je zobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 10. Celková schéma pro modelování

4.1 Simulink [8]

Pro modelování byl použitý *Simulink*, který je součástí programu *Matlab*. MATLAB (Matrix Laboratory) je programový balík, který umožňuje na jednom místě programovat, provést výpočty i současně simulovat různé dynamické jevy. Simulink je grafický programovací jazyk v Matlab-u, který zjednodušuje modelování, simulace a následné analyzování dynamiky systémů.

Základní bloky dostupné v Simulink-u jsou hlavně bloky pro matematické operace a pro zpracování signálů. Všechny komponenty jsou v knihovně, kde jsou rozděleny do podskupin dle funkcí, např. vstupy, výstupy, logické operace, matematické operace atd. U bloků lze nastavovat různé hodnoty, vlastnosti, počáteční stavy atd. Umožní aj spojit různé signály do jednoho vedení pomocí bloku *Multiplex*, čím lze zvyšovat přehlednost celého modelu.

Integrace s Matlab-em umožní používání skriptů pro nastavování parametrů a provedení složitějších výpočtů.

Nevýhodou Simulink-u je snížení simulačního výkonu ve srovnání s programy používající jenom kód; přehled modelu není tak dobrý jak u programů pro elektrické

modelování a je optimalizován hlavně pro matematické modely, což znamená, že všechny závislosti daného problému (např. v elektrickém obvodu) se musí převést do matematických vztahů a dle toho je namodelovat.

Simulink obsahuje i rozšíření, takzvané *toolbox-y*, které jsou optimalizovány pro dané oddělení např.: *Fuzzy Logic Toolbox*, *Real-Time Workshop*, *SimPowerSystems*, *3D Animation*, *Video and Image Processing Blockset*, *Simscape* který obsahuje v sobě *SimElectronics* a *SimMechanics*, a další.

Verze softwarů, které byly použity pro vypracování diplomové práce:

- MATLAB 8.0.0.783 (R2012b)
- Simulink 8.0 (R2012b)

4.2 Modelování superkondenzátoru

4.2.1 Základný popis kondenzátoru [9]

Je to pasivní součástka, která hromadí elektrickou energii (náboj). Jeho hlavní části jsou vodivé elektrody, které jsou ve formě desek. Mezi nimi je dielektrikum, kde se nacházejí akumulované náboje (energie). Na elektrody kondenzátoru jsou přivedeny elektrické náboje opačných polarit a dielektrikum nedovolí, aby se náboje vyrušily (neutralizovaly). Na elektrodě kondenzátoru se nachází náboj s označením Q (absolutní hodnota náboje na jedné z elektrod) a mezi elektrodami je napětí U . Kapacita kondenzátoru se vyjádří vztahem:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4.1)$$

kde	C – kapacita kondenzátoru	[F]
	Q – náboj na elektrodě	[C]
	U – napětí mezi elektrodami	[V]

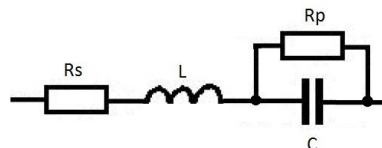
Kapacita kondenzátoru závisí od jeho geometrických parametrů, které zobrazuje vztah:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (4.2)$$

kde	ε_0 – permitivita vakua	$[8,89 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}]$
	ε_r – relativní permitivita materiálu dielektrika	[-]
	S – plocha elektrod	$[\text{m}^2]$
	d – vzdálenost elektrod	[m]

Obvodové schéma reálného klasického kondenzátoru je znázorněno na Obrázek 111, kde prvky zobrazují:

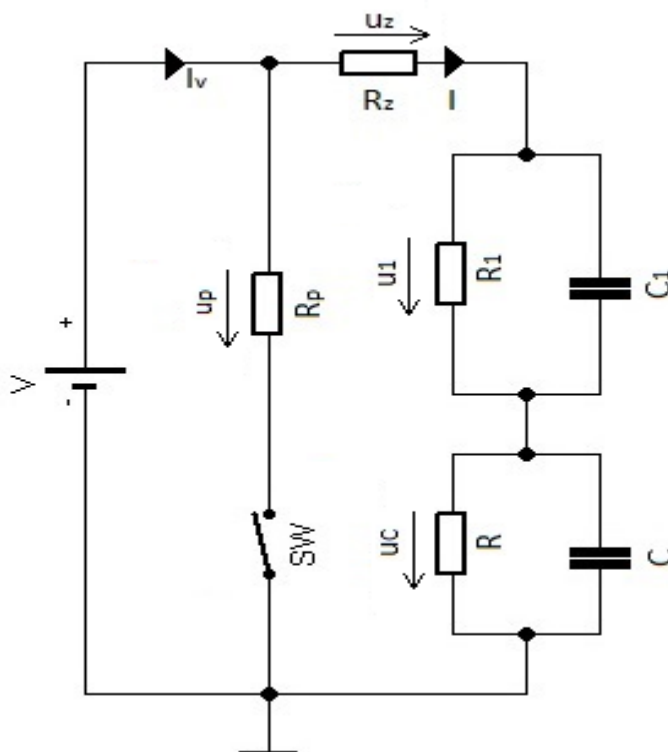
R_S – sériový odpor kondenzátoru	$[\Omega]$
L – indukčnost přívodů	[H]
R_P – izolační odpor kondenzátoru	$[\Omega]$
C – vlastní kapacita kondenzátoru	[F]



Obrázek 11. Náhradní schéma reálného kondenzátoru

4.2.2 Model superkondenzátoru

Pro modelování superkondenzátoru bylo používáno schéma zobrazené na obrázku 12., použité dle literatury [8].



Obrázek 12. Schéma pro nabíjení superkondenzátoru

Popis jednotlivých prvků zapojení na obrázku 12.:

Kondenzátor – C představuje hlavní kapacitu. Množství uložené energie a míra kolísání hladiny energie je určena také touto hodnotou.

Odpor – R , který je spojen paralelně s kondenzátorem C , představuje efekt samovybíjení.

Odpor – R_z představuje ztráty během nabíjení a vybíjení.

Odpor – R_p provádí přepětiovou ochranu během nabíjení prvku. Spínač řídí jeho připojení ke superkondenzátoru na základě výšky napětí - vyrovnáváním napěťové úrovně. Je to důležité kvůli předcházení poškození kondenzátorů. Vyrovnávání napětí je důležité proto, aby napětí na jednom článku nepřevyšovalo více než napětí na ostatních, protože by to skončilo poškozením (výbuchem). Takový napěťový rozdíl může nastat,

když jeden z článků má nižší kapacitu než ostatní. Následkem toho akumuluje více energie.

Odpor – R1 a kondenzátor – C1 jsou v obvodu pro modelování rychlých změn v chování superkondenzátoru. Hodnota kondenzátoru *C1* je rovna 1/13 hlavní kapacity kondenzátoru *C*.

Zdroj V - stejnosměrný zdroj napětí, který symbolizuje nabíjení superkondenzátoru s konstantním proudem.

Ze schématu na obrázku 12. lze odvodit vztahy (4.3) potřebné pro modelování v Simulink-u. Odvozené vzorce jsou následovné:

$$\begin{aligned} I &= I_V - \frac{u_p}{R_p} \\ u_z &= I \cdot R_z \\ \frac{d}{dt}u_1 &= \frac{1}{C_1} \left(I - \frac{u_1}{R_1} \right) \\ \frac{d}{dt}u_c &= \frac{1}{C} \left(I - \frac{u_c}{R} \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

kde	I_V – je proud ze zdroje nabíjení	[A]
	I – je proud procházející odporem R_z	[A]
	u_p – je napětí na odporu R_p	[V]
	u_z – je napětí na odporu R_z	[V]
	u_1 – je napětí na odporu $R1$ a kondenzátoru $C1$	[V]
	u_c – je napětí na odporu R a kondenzátoru C	[V]

Výsledné napětí, které slouží, jako napájení pro motor vozidla se určuje následovně:

$$U_c = u_z + u_1 + u_c \quad (4.4)$$

kde U_c – je výstupné napětí ze superkondenzátoru [V]

4.2.3 Parametre modelu

Pro zvolení parametrů modelu superkondenzátoru byla použita literatura [4], odkud byla převzata Tabulka 5. V tabulce 5. jsou zobrazeny požadavky pro úložiště energie pro elektrické a hybridní vozidla v kategorii střední osobní automobily.

Tabulka 5. Požadavky pro úložiště energie u různých elektrických vozidel [4]

Typ vozidla	Napětí systému [V]	Potřebná energie pro skladování [kWh]	Životné cykly [-]	Hloubka vybíjení [%]
EV	300 – 400	15 – 30	2000 - 3000	70-80
PHEV	300 – 400	6 -12 (baterie) 0,1-0,15 (sup.kondenz)	2500 - 3500	60-80

Pro výpočet potřebné kapacity použijeme vzorec (2.1). Hodnotu energie a napětí zvolíme z tabulky 5. následovně: $E = 30 \text{ kWh}$ a napětí $U_C = 300 \text{ V}$.

Nejdříve se pro výpočet hodnoty kapacity jednoho článku upraví vzorec (2.1) a po dosazení zvolených hodnot určíme potřebnou kapacitu kondenzátoru C :

$$C = 9600 \cdot \frac{E}{U_C^2} = 9600 \cdot \frac{30 \cdot 10^3 \text{ Wh}}{300^2 \text{ V}} = 3200 \text{ F}$$

Po výpočtu potřebné kapacity jednoho článku byl vybrán typ superkondenzátoru:

BCAP 3400 P 285K04 od firmy Maxwell. Parametre vybraného prvku jsou zobrazeny v tabulce 6.

Tabulka 6. Parametre superkondenzátoru **BCAP 2000 P 270 K04** [16]

Maxwell superkondenzátor BCAP 2000 P 270 K04	
Kapacita	3400 F
Jmenovité napětí	2,85 V
Maximální proud	2000 A
Uložená energie	3,84 Wh
Špičkový výkon	14 kW/kg
Hmotnost	520 g
Rozměry	138mm x Ø 60,4mm

Následně je potřeba určit počet superkondenzátorů na základě celkového napětí U_S (viz Tabulka 5.) a jmenovitého napětí jednoho článku U_{jm} (viz Tabulka 6.). Výpočet se provede následovně pomocí vztahu (4.5):

$$n = \frac{U_S}{U_{jm}} = \frac{300 \text{ V}}{2,85 \text{ V}} = 106 \text{ ks} \quad (4.5)$$

kde n – počet článků [-]
 U_S – napětí v systému (napájení pro motor) [V]
 U_{jm} – jmenovité napětí jednoho článku [V]

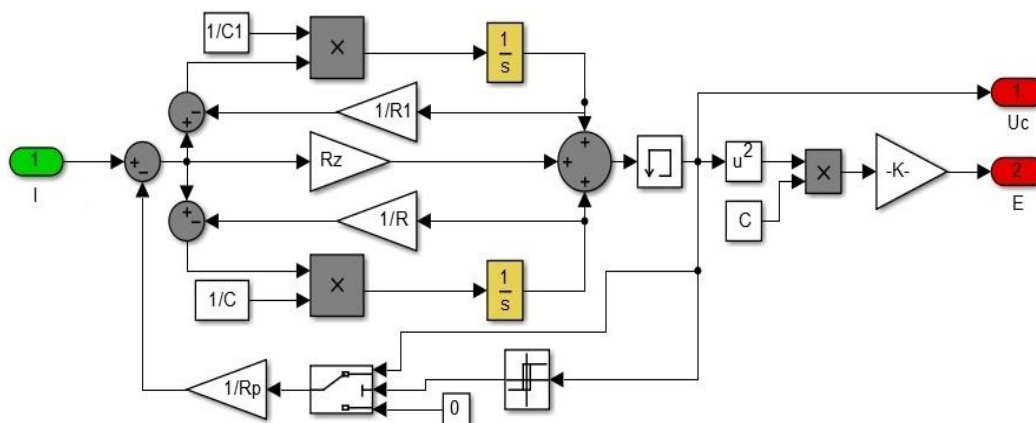
Na základě počtu článků n (vypočtené pomocí rovnice (4.5)) a hmotnosti jednoho článku (viz. Tabulka 6.) zjistíme, že blok superkondenzátoru bude mít hmotnost 55,1kg (bez spojovacích prvků).

Výslední parametre modelu superkondenzátoru jsou zobrazené v tabulce 7. Velikost hodnoty hlavní kapacity bylo vypočtené výše. Hodnoty odporů a pomocné kapacity C_1 byly zvoleny podle literatury [8].

Tabulka 7. Parametre modelu superkondenzátoru

Prvek	C [F]	C1 [F]	R [Ω]	R1 [Ω]	Rz [Ω]	Rp [Ω]
Hodnota	3400	261,54	$18 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$52 \cdot 10^{-3}$

Nabíjení prvku bylo modelováno pomocí konstantní proudu 200A. Výsledné napětí z prvku superkondenzátorového bloku je $U_{kond} = 300V$. Tato hodnota dělená hodnotou $\sqrt{3}$ se rovná 173V, který představuje fázové napětí pohonu vozidla, motoru PMSM. Na základě odvozených vzorců (4.3) a (4.4) a určených parametrů (viz Tabulka 7.) byl vytvořen model superkondenzátoru v Simulink-u. Výsledný model je zobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13. Model superkondenzátoru v Simulink-u

4.3 Matematické transformace [12] [13]

Pro zjednodušení matematického popisu synchronního motoru s permanentním magnetem byly použity dvě transformace, Clarkova a Parkova. Tyto transformace jsou popsány v následujících kapitolách.

4.3.1 Clarkova transformace

Je to transformace, které transformuje trojdimenzionální souřadnicový systém, označovaný jako abc , do dvojdimenzionálního souřadnicové soustavy, označovaného jako $\alpha\beta$ bez ztráty informace. Předpoklad transformace je, že veličiny s indexy a, b, c jsou souměrné s fázovým posuvem $\gamma = 2/3 \pi$. Tento předpoklad je splněn u trojfázových motorů se satorovým vinutím do hvězdy. Princip Clarkovy transformace je zobrazeno na obrázku 14., převzato z literatury [12].

Rovnice (4.6) zobrazuje závislost mezi veličinami na jednotlivých osách v trojdimenzionální soustavě abc :

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \quad (4.6)$$

kde i_a, i_b, i_c – jsou veličiny na jednotlivých osách v trojdimenzionální souřadnicové soustavě

Maticový zápis transformace veličin z trojdimenzionální souřadnicové soustavy abc do dvojdimenzionálního $\alpha\beta$ je popsán následovně:

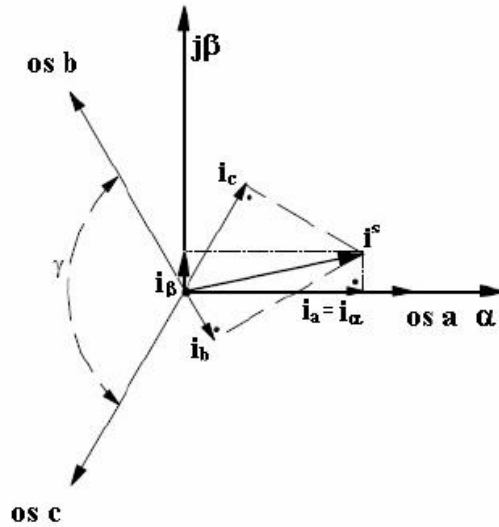
$$\begin{pmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{pmatrix} = T_{\alpha\beta}^T \begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos 2\gamma \\ 0 & \sin \gamma & \sin 2\gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

kde i_α, i_β – jsou veličiny v osách α a β v dvojdimenzionální soustavě $\alpha\beta$ určené pomocí transformací veličin i_a, i_b, i_c z trojdimenzionální soustavy abc .

i_a, i_b, i_c – jsou původní veličiny na osách a, b, c v souřadnicové soustavě abc

γ – fázový posuv mezi osami a, b, c v souřadnicové soustavě abc

$T_{\alpha\beta}$ – transformační matice Clarkovy transformace



Obrázek 14. Princip Clarkovy transformace [12]

Následně zpětná Clarkova transformace z dvojrozměrné souřadnicové soustavy $\alpha\beta$ do trojrozměrné souřadnicové soustavy abc je:

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

4.3.2 Parkova transformace

Parkova transformace umožňuje transformovat statickou souřadnicovou soustavu do dynamické souřadnicové soustavy, které jsou vzájemně posunuty o úhel natočení θ . V tomto případě statickou soustavu představuje stator motoru a dynamickou soustavu rotor motoru. Po transformaci jsou převedeny veličiny ze statické souřadnicové soustavy $\alpha\beta$ do dynamické souřadnicové soustavy dq . Princip Parkovy transformace je zobrazený na obrázku 15.

Maticový zápis Parkovy transformace je zobrazen následovně:

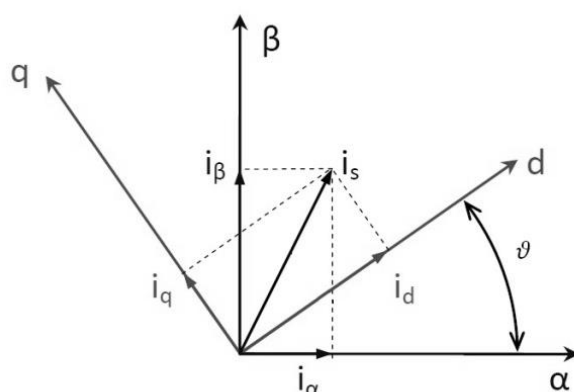
$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = T_{dq}^T \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

kde i_d, i_q – jsou veličiny na osách d a q v dynamické souřadnicové soustavě dq určené pomocí transformací veličin i_α, i_β , ze statické souřadnicové soustavy $\alpha\beta$.

i_α, i_β – jsou původní veličiny na osách α a β v statické souřadnicové soustavě $\alpha\beta$

ϑ – reprezentuje úhel vzájemného posunutí soustav $\alpha\beta$ a dq

T_{dq} – transformační matice Parkovy transformace



Obrázek 15. Princip Parkovy transformace [19]

Inverzní Parkova transformace ze souřadnicové soustavy dq do $\alpha\beta$ je následovná [13]:

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

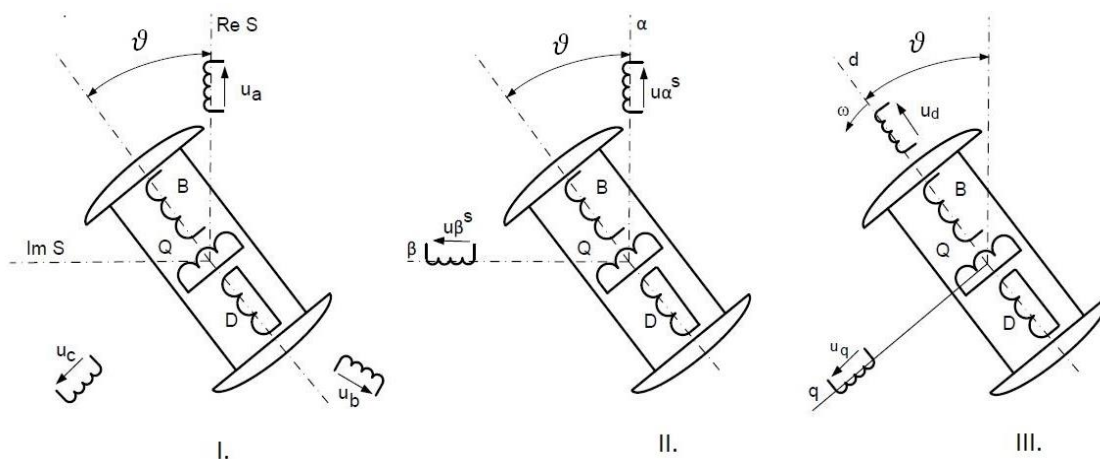
4.4 Modelování synchronního motoru s PM [10] [13]

Stator synchronního motoru s permanentním magnetem má trojfázové vinutí a jeho rotor obsahuje soustavu permanentních magnetů. Po přivedení napětí na statorové vinutí vznikne točivé magnetické pole na statoru. To nutí otáčet rotor elektromagnetickou silou synchronně s točivým magnetickým polem statoru.

Pro modelování motoru PMSM byly zavedeny předpoklady pro zjednodušení [13]:

- zanedbává se saturace,
- jsou zanedbatelně malé vířivé proudy a hystereze,
- indukované elektromagnetické pole je sinusové,
- nejsou pole dynamických proudů,
- rotor neobsahuje klec.

Na obrázku 16 I. je zobrazeno reálné rozložení satorových a rotorových vinutí v synchronním motoru. Mezi satorovými napětími u_a, u_b, u_c , je fázový posun $\vartheta = 2/3\pi$. V rotoru jsou zobrazeny vinutí: B – budící, Q – příčné tlumící vinutí a D – podélné tlumící vinutí, které jsou spojeny nakrátko. Úhel ϑ zobrazuje fázový posuv mezi statorem a rotorem motoru PMSM.



Obrázek 16. Rozložení vinutí na synchronním motoru ve třech soustavách [10]

Část II. na obrázku 16. zobrazuje rozložení vinutí satoru motoru PMSM v dvojdimenzionální souřadnicové soustavě $\alpha\beta$. Satorové napětí u_α, u_β byly určeny pomocí Clarkovy transformací. Část III. zobrazuje fiktivní satorové vinutí v souřadnicové soustavě dq . Fiktivní satorové napětí u_d a u_q byly určeny pomocí Parkovy transformace.

4.4.1 Matematický popis synchronního motoru s PM

Vyjádření okamžitých hodnot napětí u_a, u_b , a u_c na satorovém vinutí jsou zobrazeny v rovnicích označených (4.11):

$$\begin{aligned} u_a(t) &= U_{am} \sin(\omega t) = R \cdot i_a(t) + \frac{d\Psi_a}{dt} \\ u_b(t) &= U_{bm} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = R \cdot i_b(t) + \frac{d\Psi_b}{dt} \\ u_c(t) &= U_{cm} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = R \cdot i_c(t) + \frac{d\Psi_c}{dt} \end{aligned} \quad (4.11)$$

kde	$u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ – okamžité hodnoty satorových napětí	[V]
	U_{am}, U_{bm}, U_{cm} - maximální hodnoty satorových napětí	[V]
	ω – uhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
	R – odpor satoru motoru PMSM	[Ω]
	$i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ – okamžité hodnoty satorových proudů	[A]
	$\Psi_a(t), \Psi_b(t), \Psi_c(t)$ – okamžité hod. sprážených mag. toků	[Wb]

Rovnice vyjadřující moment motoru je následovný [13]:

$$M_m = \frac{3}{2} p_p \Psi_f I_s \quad (4.12)$$

kde M_m – moment motoru [Nm]
 p_p – počet pólových dvojíc motoru [-]
 Ψ_f – magnetický tok daný permanentním magnetem [Wb]
 I_s – amplituda fázových proudů [A]

Celkový moment M_C působící v soustavě lze vyjádřit následovně:

$$M_C = M_z + k_{\Pi} \omega_m + J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.13)$$

kde M_C – celkový moment [Nm]
 M_z – moment zátěže [Nm]
 k_{Π} – koeficient tlumení (zanedbává se) [-]
 ω_m – mechanická rychlost rotoru [rad.s⁻¹]
 J_m – moment setrvačnosti motoru [kg.m²]

Mechanickou rychlost motoru ω_m lze získat z elektrické uhlové rychlosti ω_e motoru.

Závislost je zobrazena pomocí rovnice (4.14)

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{p_p} \quad (4.14)$$

kde p_p – počet pólových dvojíc motoru [-]
 ω_m – mechanická rychlost rotoru [rad.s⁻¹]
 ω_e – elektrická úhlová rychlost motoru [rad.s⁻¹]

Po upravení rovnic (4.11) do dvojdimenzionálního souřadnicového soustavě dq , pomocí Parkové transformace lze zobrazit rovnice pro napětí u_d a u_q následovně:

$$u_d = R i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (4.15)$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (4.16)$$

kde u_d, u_q – statorové napětí v souřadnicovém soustavě dq [V]
 i_d, i_q – statorové proudy v souřadnicovém soustavě dq [A]
 ω_e – elektrická úhlová rychlost [rad.s⁻¹]
 R – odpor statoru motoru PMSM [Ω]
 Ψ_d, Ψ_q – sprážené mag. toky v soustavě dq [Wb]

Spražené magnetické toky Ψ_d, Ψ_q z rovnic (4.15) a (4.16) lze vyjádřit:

$$\psi_d = L_d i_d + K_E \quad (4.17)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4.18)$$

kde Ψ_d, Ψ_q – sprážené mag. toky v soustavě dq [Wb]
 L_d, L_q – vlastní indukčnost stator. vinutí v soustavě dq [H]
 i_d, i_q – statorové proudy v soustavě dq [A]
 K_E – konstanty elektromotorické síly [V.s]

(označován i jako sprážený magnetický tok vyvolaný magnety na rotoru)

Spražené magnetické toky Ψ_d , Ψ_q jsou závislé na vlastní indukčnosti vinutí L_d , L_q , na jednotlivých proudech i_d , i_q v soustavě dq a na elektromotorické konstantě motoru K_E . Po dosazení vztahů pro sprážené magnetické toky (4.17) a (4.18) do rovnic statorových napětí v dq soustavě (4.15) a (4.16) dostaneme následující závislosti:

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \quad (4.19)$$

$$u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e K_E \quad (4.20)$$

kde	u_d, u_q – statorové napětí v soustavě dq	[V]
	i_d, i_q – statorové proudy v soustavě dq	[A]
	R – odpor statoru motoru PMSM	[Ω]
	L_d, L_q – vlastní indukčnost stator. vinutí v soustavě dq	[H]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]
	ω_e – elektrická úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]

Po dosazení vztahů sprážených magnetických toků Ψ_d , Ψ_q (4.17) a (4.18) do rovnice momentu motoru (4.12) a následně úpravě dostaneme vztah pro moment motoru M_m :

$$M_m = \frac{3}{2} p_p [(L_d - L_q) i_d i_q + K_E i_q] \quad (4.21)$$

kde	p_p – počet pólových dvojic motoru	[-]
	M_m – moment motoru	[Nm]
	L_d, L_q – vlastní indukčnost stator. vinutí v soustavě dq	[H]
	i_d, i_q – statorové proudy v soustavě dq	[A]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]

Když proud i_d je blízký nule, lze upravit rovnice pro moment motoru M_m (4.21) následovně:

$$M_m = \frac{3}{2} p_p K_E i_q \quad (4.22)$$

Po úpravě rovnic napětí u_d a u_q (4.19), (4.20) a rovnice momentu motoru M_m (4.22) lze získat stavový popis motoru PMSM.

Úprava napěťových rovnic u_d (4.19) a u_q (4.20):

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q \quad (4.23)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d - \frac{K_E}{L_q} \omega_e \quad (4.24)$$

kde	i_d, i_q – statorové proudy v soustavě dq	[A]
	L_d, L_q – vlastní indukčnost stator. vinutí v soustavě dq	[H]
	u_d, u_q – statorové napětí v soustavě dq	[V]
	R – odpor statoru motoru PMSM	[Ω]
	ω_e – elektrická úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]

Upravena rovnice pro moment motoru M_m (4.22), od kterého se odečítá moment zátěže M_z :

$$\frac{d}{dt} \omega_e = \frac{p_p}{J_m} \left(\frac{3}{2} p_p K_E i_q - M_z \right) \quad (4.25)$$

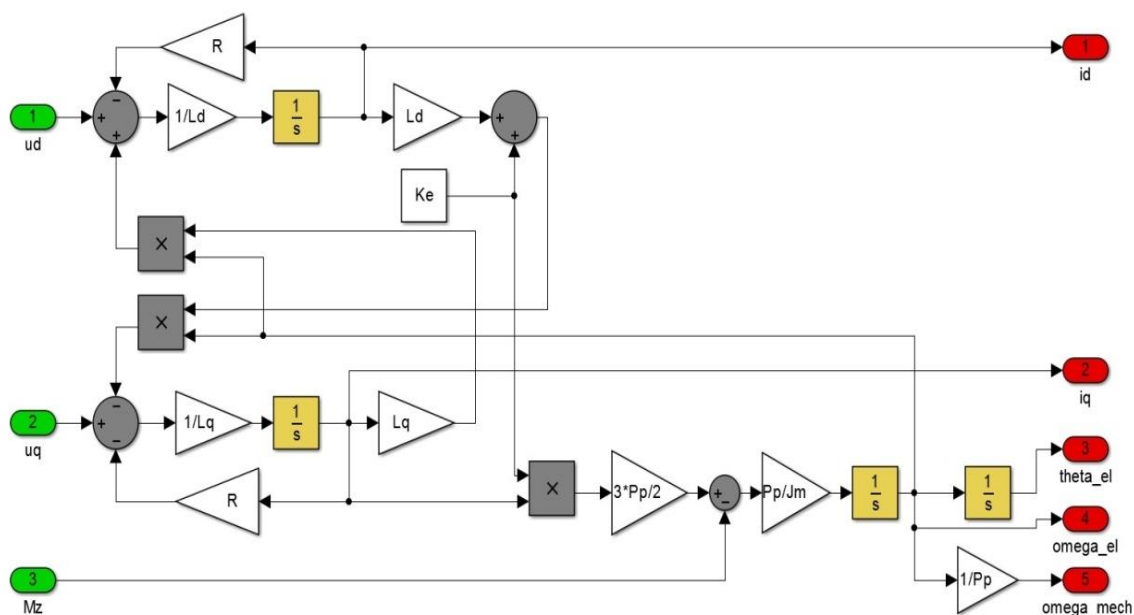
kde	ω_e – elektrická uhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
	p_p – počet pólových dvojíc motoru	[-]
	J_m – moment setrvačnosti motoru	[kg.m ²]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]
	i_q – satorové proudy v souřadnicovém soustavě dq	[A]
	M_z – moment zátěže	[Nm]

Z elektrické uhlové rychlosti motoru lze vyjádřit ϑ :

$$\frac{d}{dt} \vartheta = \omega_e \quad (4.26)$$

kde	ϑ – poloha rotoru	[rad]
	ω_e – elektrická uhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]

Pomocí výše popsaných čtyřech stavových rovnic (4.23), (4.24), (4.25) a (4.26) byl vytvořen model synchronního motoru s permanentním magnetem PMSM v Simulink-u, který je zobrazený na obrázku 17.



Obrázek 17. Model motoru PMSM v Simulink-u

Parametre motoru PMSM, které byly použity pro modelování, jsou zobrazeny v tabulce 8.

Tabulka 8. Parametre motoru PMSM

Parametr	Značený	Velikost
Jmenovité napětí	U_n	187 V
Jmenovitý proud	I_n	172 A
Jmenovité otáčky	n_n	2 500 min ⁻¹
Jmenovitý moment	M_n	191 Nm
Konstanta motoru	K_E	0,071 Vs
Moment setrvačnosti	J_m	0,1 kg.m ²
Odpor statoru	R	0,2 Ω
Podélná indukčnost	L_d	32 mH
Příčná indukčnost	L_q	32 mH
Počet pólů	p_p	10

4.4.2 Vektorové řízení [13][14]

Vektorové řízení je často používané řízení u synchronních motorů. Jeho principem je řízení magnetického pole statoru a rotoru tak, aby byly na sebe kolmé. Tento princip je aplikován u stejnosměrných motorů s cizím buzením, kde kolmá orientace magnetických polí je zajištěna komutátorem.

Výstupné proudy z motoru PMSM jsou transformovány do souřadnicové soustavy dq , kde část statorového proudu i_d ovlivňuje magnetický sprážený tok motoru ψ_d . Tato složka statorového proudu je tzv. „tokotvornou“ složkou. Statorový proud i_q ovlivňuje moment motoru M_m (podobně jako kotevní proud u stejnosměrných motorů). Tato složka statorového proudu je složkou „momentotvornou“. Rovnice (4.17) a (4.22) zobrazují tyto závislosti:

$$\psi_d = L_d i_d + K_E \quad (4.17)$$

$$M_m = \frac{3}{2} p_p K_E i_q \quad (4.22)$$

kde	ψ_d – sprážené magnet. toky v souřadnicové soustavě dq	[Wb]
	L_d – vlastní indukčnost statorového vinutí v soustavě dq	[H]
	i_d, i_q – statorové proudy v souřadnicové soustavě dq	[A]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]
	p_p – počet pólových dvojíc motoru	[-]
	M_m – moment motoru	[Nm]

Z rovnic lze vidět, že moment motoru M_m je dán součinem elektromotorické konstanty K_E a složky i_q statorového proudu v souřadnicové soustavě dq . Složka i_d statorového proudu je regulována na nulovou hodnotu proto, aby neovlivňovala hodnotu spráženého magnetického toku ψ_d . Tímto lze dosáhnout, že sprážený magnetický tok ψ_d bude závislý jenom na hodnotě elektromotorické konstanty motoru K_E .

4.4.3 Odstranění křížových vazeb proudu motoru [13]

Z napěťových rovnic motoru PMSM (4.23) a (4.24) lze vidět, že proudy i_d a i_q jsou vzájemně závislé (mají křížové vazby). Pomocí odvazbování lze zajistit, aby se proudy i_d a i_q neovlivňovaly vzájemně. Po upravení napěťových rovnic (4.23) a (4.24) lze vidět složky, které je potřeba odečíst nebo přičíst k derivaci proudů i_d a i_q , aby se eliminoval vzájemný vliv statorových proudů. Tyto části jsou tlustě vyznačeny v rovnicích (4.27) a (4.28).

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d - Ri_d + \mathbf{L}_q \omega i_q}{L_d} \quad (4.27)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{u_q - Ri_q - \mathbf{L}_d \omega i_d - K_E \omega}{L_q} \quad (4.28)$$

kde	i_d, i_q – statorové proudy v souřadnicové soustavě dq	[A]
	L_d, L_q – vlastní indukčnost stator. vinutí v soustavě dq	[H]
	u_d, u_q – statorové napětí v souřadnicové soustavě dq	[V]
	R – odpor statoru motoru PMSM	[Ω]
	ω_e – elektrická uhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]

Vyjádří se nové hodnoty napětí u_d a u_q , které budou vstupovat do modelu motoru PMSM:

$$u'_d = u_d - L_q \omega i_q \quad (4.29)$$

$$u'_q = u_q + \omega_e (L_d i_d + K_E) \quad (4.30)$$

kde u'_d, u'_q – jsou stator. napětí po odstranění křížových vazeb [V]

Po dosazení vztahů pro napětí u'_d (4.29) a u'_q (4.30) do vztahů (4.27) a (4.28) lze vyjádřit následující závislost derivací statorových proudů i_d a i_q takto:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u'_d - Ri_d}{L_d} \quad (4.31)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{u'_q - Ri_q}{L_q} \quad (4.32)$$

4.4.4 Výstupní proud z PMSM

Pomocí zpětné Parkovy a zpětné Clarkovy transformace proudu i_d a i_q ze soustavy dq do soustavy abc jsou určeny statorové proudy i_a, i_b a i_c motoru PMSM. Výslední proud motoru I_m , který je následně zpětně přivedený na vstup superkondenzátoru, je vypočtený pomocí vektorového součinu statorových proudů i_a, i_b a i_c , a jeho polarita se určí pomocí proudů i_d a i_q :

$$I_m = \text{sgn}(\tan^{-1}(i_q, i_d)) \cdot \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2} \quad (4.33)$$

kde	i_a, i_b, i_c – jsou statorové proudy motoru v soustavě abc	[A]
	i_d, i_q – jsou statorové proudy motoru v soustavě dq	[A]
	I_m – je výsledný proud z motoru	[A]

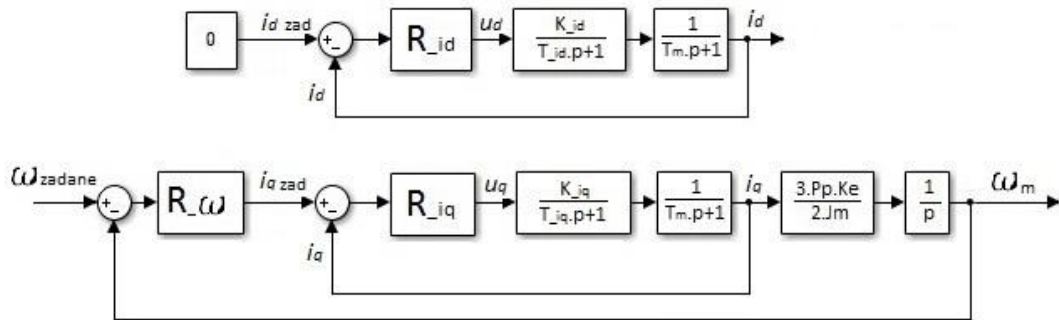
4.4.5 Návrh regulátorů

Pro návrh regulátorů proudů i_d a i_q a otáček ω_m se předpokládá přenos snímačů proudů a otáček roven jedné. Do regulačního obvodu byl implementován i blok představující měnič (napětový střídač) s frekvencí 1kHz, časová konstanta bloku měniče $T_m = 1 \cdot 10^{-4} \text{s}$.

Na obrázku 18. lze vidět regulační obvody pro regulaci mechanických otáček ω_m a proudů i_d a i_q motoru PMSM.

Regulační obvod pro řízení proudu i_d je jednoduchý regulační obvod, kde žádaná hodnota proudu i_d je regulována na nulovou hodnotu.

Řízení mechanických otáček motoru ω_m a proudu i_q tvoří rozvětvený regulační obvod s pomocnou veličinou (kaskádní regulace), kde hlavní veličinou je proud i_q a pomocnou jsou mechanické otáčky motoru ω_m . Vnitřní smyčka tvoří regulace proudu i_q a vnější smyčka tvoří regulace otáček motoru ω_m .



Obrázek 18. Regulační obvody pro řízení proudu a otáček PMSM

Přenosová funkce proudové části s měničem v Laplaceově transformaci je vyjádřena následovně:

$$F_i(p) = \frac{K_i}{T_i p + 1} \cdot \frac{1}{T_m p + 1} \quad (4.34)$$

kde	$K_i = 1/R$ – zesílení přenosu proudu	[-]
	$T_i = L/R$ – časová konstanta přenosu proudu	[s]
	$T_m = 1 \cdot 10^{-4} \text{s}$ – zvolená časová konstanta měniče	[s]
	L – vlastní indukčnost statorového vinutí v soustavě dq	[H]
	R – odpor statoru motoru PMSM	[Ω]

Regulátory statorových proudů i_d a i_q byly navrženy pomocí metody optimálního modulu (OM). Navrhnuté regulátory jsou typu PI. Podle metody OM se vypočítá zesílení proporcionální složky K_{i_P} a integrační složky K_{i_I} regulátorů následovně:

$$\begin{aligned} K_{i_P} &= \frac{L}{2 \cdot \tau_\sigma} \\ K_{i_I} &= \frac{R}{2 \cdot \tau_\sigma} \end{aligned} \quad (4.35)$$

kde	K_{i_P} – zesílení proporcionální složky regulátoru proudu	[-]
	K_{i_I} – zesílení integrační složky regulátoru proudu	[-]
	τ_σ – časová konstanta pro regulační smyčku, je rovna časové konstantě měniče $1 \cdot 10^{-4}$ s	[s]
	L – vlastní indukčnost satorového vinutí v soustavě dq	[H]
	R – odpor statoru motoru PMSM	[Ω]

Výsledné tvary regulátorů proudů R_{i_d} a R_{i_q} mají přenosový tvar:

$$R_i(p) = K_{i_P} + \frac{K_{i_I}}{p} \quad (4.36)$$

Regulátory proudu R_{i_d} a R_{i_q} byly navrženy stejným způsobem, jelikož i indukčnosti vinutí L_d a L_q jsou stejné. Integrační část regulátorů proudů jsou omezené na hodnotu jmenovitého proudu motoru, toto omezení slouží pro potlačení wind-up jevu. Vstup do regulátorů proudů se vypočítá ze žádané hodnoty proudu i_d a i_q a z výstupních hodnot proudů i_d a i_q z motoru PMSM. Výstup z regulátorů proudů jsou napěťové hodnoty u_d a u_q , které po omezení (popsáno v kapitole 4.4.6.) a odvazbování (popsáno v kapitole 4.4.3.) vstoupí do motoru PMSM.

Regulátor mechanických otáček R_{ω} typu PI byl navržen pomocí metody symetrického optima (SO). Nejdřív bylo vypočteno celkové zesílení přenosu otáček K_ω z parametrů motoru PMSM následovně:

$$K_\omega = \frac{3 \cdot p_p \cdot K_e}{2 \cdot J_m} \quad (4.37)$$

kde	p_p – počet pólových dvojic motoru	[-]
	J_m – moment setrvačnosti motoru	[kg.m ²]
	K_E – konstanty elektromotorické síly	[V.s]
	K_ω – zesílení přenosu otáček	[-]

Následovně byly vypočteny podle metody SO hodnoty zesílení proporcionální složky K_{ω_P} a integrační složky K_{ω_I} regulátoru mechanických otáček ω_m následovně:

$$K_{\omega_P} = \frac{4 \cdot \tau_\sigma}{8 \cdot K_\omega \cdot \tau_\sigma^2}$$

$$K_{\omega_I} = \frac{1}{8 \cdot K_\omega \cdot \tau_\sigma^2} \quad (4.38)$$

kde	$K_{\omega_P}, K_{\omega_I}$ – zesílení proporcionální a integrační složky regulátoru otáček ω_m	[-]
	K_ω – zesílení přenosu otáček	[-]
	τ_σ – časová konstanta regulační smyčky	[$1 \cdot 10^{-4}$ s]

Výsledný tvar regulátoru otáček R_{ω} :

$$R_{\omega}(p) = K_{\omega_P} + \frac{K_{\omega_I}}{p} \quad (4.39)$$

Integrační složka K_{ω_I} regulátoru R_{ω} je omezena stejně jak u regulátorů proudů R_{i_d} a R_{i_q} . Vstupním parametrem do regulátoru R_{ω} je rozdíl mezi žádanou hodnotou a reální hodnotou mechanických otáček motoru ω_m . Výstupem R_{ω} je hodnota proudu, který vstupuje do regulátoru proudu R_{i_q} jako žádaná hodnota.

4.4.6 Proudové a napět'ové omezení [19]

Synchronní motor s permanentním magnetem má omezený statorový proud, z toho důvodu je potřeba omezit složky statorového proudu i_d a i_q během simulací. U motoru PMSM se vyvolává magnetický tok, který působí proti magnetickému toku statoru, tím zmenšuje výsledný magnetický tok (jev odbuzování). Hodnoty proudu i_d a i_q jsou v modelu omezeny dle následujícího vzorce:

$$i_{s_max} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (4.40)$$

kde i_{s_max} – maximální statorový proud motoru, [A]

byl zvolen jako $\sqrt{2} \cdot I_n = 243A$, (I_n viz Tabulka 8.)

$i_{d,q}$ – jsou statorové proudy motoru v soustavě dq [A]

Napět'ové omezení u motoru PMSM lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$u_{s_max} = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (4.41)$$

kde u_{s_max} – maximální napětí na statoru motoru PMSM [V]

(hodnota napětí ze superkondenzátoru: 173V, viz kapitola 4.2.3.)

u_d, u_q , - jsou výstupné napětí z regulátorů proudů [V]

R_{i_d} a R_{i_q} , které vstupují do motoru PMSM

Tato práce se podrobněji nezaobírá problematikou napět'ového a proudového omezení a odbuzování u motoru PMSM.

4.5 Popis dynamiky vozidla [2]

Vozidlo pro svůj pohyb potřebuje hnací sílu F_{vz} , Hnací sílu vozidlu vygeneruje elektrický pohon, v tomto případě motor typu PMSM. Elektrický motor má svůj moment M_m , viz kapitola 4.4. Moment motoru M_m je převeden na kola vozidla poloměrem r_k pomocí převodovky, která má svůj převodový poměr N a účinnost η . Vyjádření hnací síly vozidla je následovné:

$$F_{vz} = \frac{M_m \cdot N \cdot \eta}{r_k} = \frac{M_k}{r_k} \quad (4.42)$$

kde	F_{vz} – hnací síla vozidla	[N]
	M_m – moment motoru	[Nm]
	N – převodový poměr převodovky	[-]
	η – účinnost převodovky	[-]
	r_k – poloměr kola vozidla	[m]
	M_k – hnací moment na kole	[Nm]
	rovnající se momentu motoru po převodu přes převodovku	

Na pohybující se vozidlo působí aj odporové síly a to valivý odpor, vzdušný odpor, odpor stoupání a odpor zrychlení. Vyjmenované odporové síly jsou popsány níže.

Valivý odpor – O_{val} představuje způsob deformací části pneumatiky, který je v styku s vozovkou (styk pneumatiky kola s vozovkou). Lze to vyjádřit následovně:

$$O_{val} = f_k \cdot G \cdot \cos(\alpha) \quad (4.43)$$

kde	O_{val} – valivý odpor působící na vozidlo	[N]
	f_k – součinitel valivého odporu	[-]
	G – tíha vozidla = $m_v \cdot g$	[N]
	m_v – hmotnost vozidla	[kg]
	g – gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
	α – úhel stoupání/klesání (sklon) vozovky	[°]

Vzdušný odpor – O_{vzd} popisuje sílu, která působí na vozidlo proti směru pohybu během v daném prostředí. Vyjádří se následovně:

$$O_{vzd} = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v^2 \quad (4.44)$$

kde	O_{vzd} – vzdušný odpor působící na vozidlo	[N]
	c_x – součinitel odporu vzduchu	[-]
	ρ – měrná hmotnost vzduchu	[kg.m ⁻³]
	S_x – čelní plocha vozidla	[m ²]
	v – rychlost vozidla	[m.s ⁻¹]

Odpor stoupání – O_s způsobeno pohybem vozidla po nakloněné rovině. Nakloněná rovina je vyjádřena pomocí sklonu s následovně:

$$s = \frac{h}{l} = \tan(\alpha) \quad (4.45)$$

kde	h – výška nakloněné roviny	[m]
	l – délka nakloněné roviny	[m]
	α – úhel stoupání/klesání vozovky	[°]
	s – sklon vozovky	[-]

Následně odpor stoupání O_s je vyjádřený:

$$O_s = \pm G \cdot s \quad (4.46)$$

kde	O_s – odpor stoupání působící na vozidlo	[N]
	G – tíha vozidla $= m_v \cdot g$	[N]
	m_v – hmotnost vozidla	[kg]
	g – gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
	s – sklon vozovky	[-]

Odpor zrychlení - O_z je způsobený setrvačnými silovými účinky, které působí na vozidlo při změně rychlosti. Odpor zrychlení O_z se skládá z posuvné části O_{zp} , která je závislá na hmotnosti vozidla m_v a zrychlení vozidla a_x , a z rotační části O_{zr} , která je závislá na poloměru kola vozidla r_k , momentu setrvačnosti rotujících hmot vozidla J_v a na zrychlení vozidla.

Odpor zrychlení se vyjadřuje následovně:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} = (m_v \cdot a_x) + \left(\frac{J_v}{r_k^2} \cdot a_x \right) = \left(1 + \frac{J_v}{m_v \cdot r_k^2} \right) \cdot m_v \cdot a_x = \vartheta \cdot m_v \cdot a_x \quad (4.47)$$

kde	O_z – odpor zrychlení působící se na vozidlo	[N]
	O_{zp} – posuvná část odporu zrychlení, působí ve směru pohybu vozidla	[N]
	O_{zr} – rotační část odporu zrychlení	[N]
	m_v – hmotnost vozidla	[kg]
	r_k – poloměr kola vozidla	[m]
	a_x – zrychlení vozidla	[m.s ⁻²]
	J_v – moment setrvačnosti rotujících hmot vozidla	[kg.m ²]
	ϑ – součinitel rotačních hmot	[-]

Hodnota momentu setrvačnosti rotujících hmot vozidla J_v je závislá na hmotnosti vozidla m_v , velikosti rotujících hmot vozidla m_r , poloměru kola vozidla r_k (obsahuje aj setrvačnost kola), poměru převodovky N a na účinnosti převodovky η . Představuje setrvačnost rotujících mechanických částí vozidla (kolo, hřídel, atd.).

Součinitel rotačních hmot ϑ ze vztahu pro odporu zrychlení vozidla (4.47) lze vyjádřit i pomocí hmotnosti vozidla m_v a hmotnosti rotačních hmot m_r následovně:

$$\vartheta = \left(1 + \frac{J_v}{m_v \cdot r_k^2} \right) = \frac{m_v + m_r}{m_v} \quad (4.48)$$

kde	ϑ – součinitel rotačních hmot	[-]
	J_v – moment setrvačnosti rotujících hmot vozidla	[kg.m ²]
	m_v – hmotnost vozidla	[kg]
	r_k – poloměr kola vozidla	[m]
	m_r – hmotnost rotačních hmot vozidla	[kg]

Výsledný tvar rovnice obsahující všech působících sil na vozidlo je vyjádřený následovně:

$$\vartheta \cdot m_v \cdot a_x = (m_v + m_r) \cdot a_x = F_{vz} - O_{val} + O_{vzd} + O_s \quad (4.49)$$

kde

ϑ – součinitel rotačních hmot	[-]
m_v – hmotnost vozidla	[kg]
a_x – zrychlení vozidla	[m.s ⁻²]
m_r – hmotnost rotačních hmot vozidla	[kg]
F_{vz} – hnací síla vozidla	[N]
O_{val} – valivý odpor působící na vozidlo	[N]
O_{vzd} – vzdušný odpor působící na vozidlo	[N]
O_s – odpor stoupání působící na vozidlo	[N]

Po dosazení vztahů pro sílu vozidla (4.42), pro odporové síly O_{val} (4.43), O_{vzd} (4.44), O_s (4.46), O_z (4.47) a pro součinitele rotačních hmot (4.48) do výsledné rovnice, která obsahuje všechny síly působící na vozidlo (4.49), a následném upravení vztahu, lze vyjádřit celkové podélné zrychlení vozidla a_x :

$$a_x = \frac{\frac{M_k}{r_k} - (f_k \cdot m_v \cdot g) - \left(c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v^2\right) - (m_v \cdot g \cdot s)}{m_v + m_r} \quad (4.50)$$

kde

a_x – zrychlení vozidla, $a_x = \dot{v}$	[m.s ⁻²]
M_k – hnací moment na kole	[Nm]
r_k – poloměr kola vozidla	[m]
f_k – součinitel valivého odporu	[-]
m_v – hmotnost vozidla	[kg]
g – gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
c_x – součinitel odporu vzduchu	[-]
ρ – měrná hmotnost vzduchu	[kg.m ⁻³]
S_x – čelní plocha vozidla	[m ²]
v – rychlost vozidla	[m.s ⁻¹]
s – sklon vozovky	[-]
m_r – hmotnost rotačních hmot vozidla	[kg]

4.5.1 Jednotný popis modelu PMSM a vozidla

Pro zjednodušení modelu a implementace zátěže do modelu PMSM byly zavedeny úpravy na základě následujících rovnic.

Závislost mezi podélným zrychlením vozidla a_x a mechanickým zrychlením otáček rotoru pohonu $d\omega_m/dt$ je následovná:

$$a_x = \frac{d\omega_m}{dt} \cdot \frac{r_k}{N} \quad (4.51)$$

kde

a_x – zrychlení vozidla, $a_x = \dot{v}$	[m.s ⁻²]
--	----------------------

r_k – poloměr kola vozidla	[m]
N – převodový poměr převodovky	[-]
ω_m – mechanická rychlost rotoru	[rad.s ⁻¹]

Valivý odpor O_{val} , vzdušný odpor O_{vzd} a odpor stoupání O_s se vyjádří pomocí odporové síly F_{od} .

$$F_{od} = O_{val} + O_{vzd} + O_s \quad (4.52)$$

kde

F_{od} – odporové síly působící na vozidlo	[N]
O_{val} – valivý odpor působící na vozidlo	[N]
O_{vzd} – vzdušný odpor působící na vozidlo	[N]
O_s – odpor stoupání působící na vozidlo	[N]

Dále pomocí rovnice vyjadřující hnací sílu vozidla (4.42), rovnice obsahující všechny síly působící na vozidlo (4.49) a pomocí vztahu pro znázornění odporových sil působících na vozidlo (4.52) se vyjádří moment motoru PMSM M_m takto:

$$M_m = [(m_v + m_r)a_x + F_{od}] \frac{r_k}{N \cdot \eta} \quad (4.53)$$

kde

M_m – moment motoru	[Nm]
m_v – hmotnost vozidla	[kg]
m_r – hmotnost rotačních hmot vozidla	[kg]
a_x – zrychlení vozidla,	[m.s ⁻²]
F_{od} – odporové síly působící na vozidlo	[N]
r_k – poloměr kola vozidla	[m]
N – převodový poměr převodovky	[-]
η – účinnost převodovky	[-]

Po dosazení závislosti mezi podélné zrychlení vozidla a_x a mechanické zrychlení otáček rotoru PMSM (4.51) do vztahu (4.53) a následném upravení vznikne rovnice pro moment motoru M_m :

$$M_m = \left[(m_v + m_r) \frac{d\omega_m}{dt} \cdot \frac{r_k}{N} + F_{od} \right] \frac{r_k}{N \cdot \eta} = \frac{(m_v + m_r)}{\eta} \left(\frac{r_k}{N} \right)^2 \frac{d\omega}{dt} + F_{od} \frac{r_k}{N \cdot \eta} \quad (4.54)$$

kde

M_m – moment motoru	[Nm]
m_v – hmotnost vozidla	[kg]
m_r – hmotnost rotačních hmot vozidla	[kg]
ω_m – mechanický rychlost rotoru	[rad.s ⁻¹]
r_k – poloměr kola vozidla	[m]
N – převodový poměr převodovky	[-]
F_{od} – odporové síly působící na vozidlo	[N]
η – účinnost převodovky	[-]

Z upravené rovnice (4.54) se vyjádří následující proměnné:

Celkový moment setrvačnosti J_c , který v modelu motoru PMSM bude představovat součet momentu setrvačnosti motoru J_m (viz Tabulka 8.) a momentu setrvačnosti odpovídající hmotnosti vozidla a jeho rotujícím hmotám J_v :

$$J_c = J_v + J_m = \frac{(m_v + m_r)}{\eta} \left(\frac{r_k}{N} \right)^2 + J_m \quad (4.55)$$

kde	J_c – celkový moment setrvačnosti motoru a vozidla	[kg.m ²]
	J_v – moment setrvačnosti vozidla	[kg.m ²]
	J_m – moment setrvačnosti motoru	[kg.m ²]
	m_v – hmotnost vozidla	[kg]
	m_r – hmotnost rotačních hmot vozidla	[kg]
	η – účinnost převodovky	[-]
	r_k – poloměr kola vozidla	[m]
	N – převodový poměr převodovky	[-]

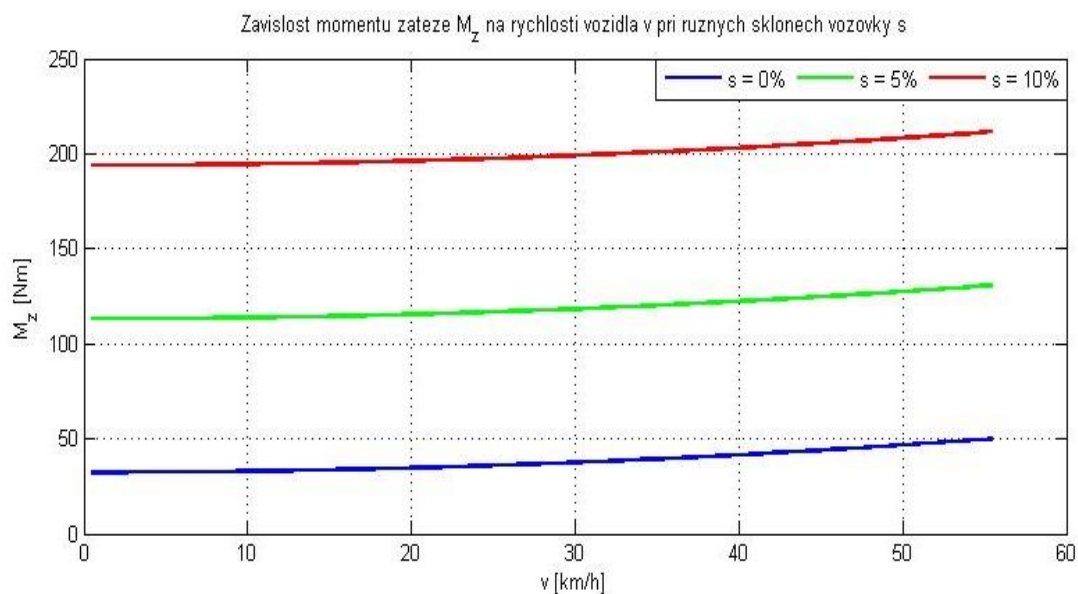
Moment zátěže motoru M_z , který bude obsahovat odpor valivý O_{val} , odpor vzdušný O_{vzd} a odpor stoupání O_s :

$$M_z = F_{od} \frac{r_k}{N \cdot \eta} = \left[(f_k \cdot m_v \cdot g) + \left(c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v^2 \right) + (m_v \cdot g \cdot s) \right] \frac{r_k}{N \cdot \eta} \quad (4.56)$$

kde	M_z – moment zátěže motoru, působené vozidlem	[kg.m ²]
	F_{od} – odporové síly působící na vozidlo	[N]
	r_k – poloměr kola vozidla	[m]
	N – převodový poměr převodovky	[-]
	η – účinnost převodovky	[-]
	f_k – součinitel valivého odporu	[-]
	m_v – hmotnost vozidla	[kg]
	g – gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
	c_x – součinitel odporu vzduchu	[-]
	ρ – měrná hmotnost vzduchu	[kg.m ⁻³]
	S_x – čelní plocha vozidla	[m ²]
	v – rychlost vozidla	[m.s ⁻¹]
	s – sklon vozovky	[-]

Během simulování jízdy moment zátěže M_z popsán rovnicí (4.56) zatíží pohon vozidla (v tomto případě motor PMSM). Zátěžový moment M_z je závislý na aktuální rychlosti vozidla v a na sklonu vozovky s , ostatní veličiny z rovnice (4.56) se považují za konstantní.

Závislost momentu zátěže M_z na rychlosti vozidla v a sklonu vozovky s , dle rovnice (4.56), lze vidět na grafu 1.



Graf 1. Závislost zátěžového momentu M_z na rychlosti vozidla v a sklonu vozovky s

Parametre vozidla, které byly použity během modelování, jsou zobrazeny v tabulce 9.

Tabulka 9. Parametre vozidla

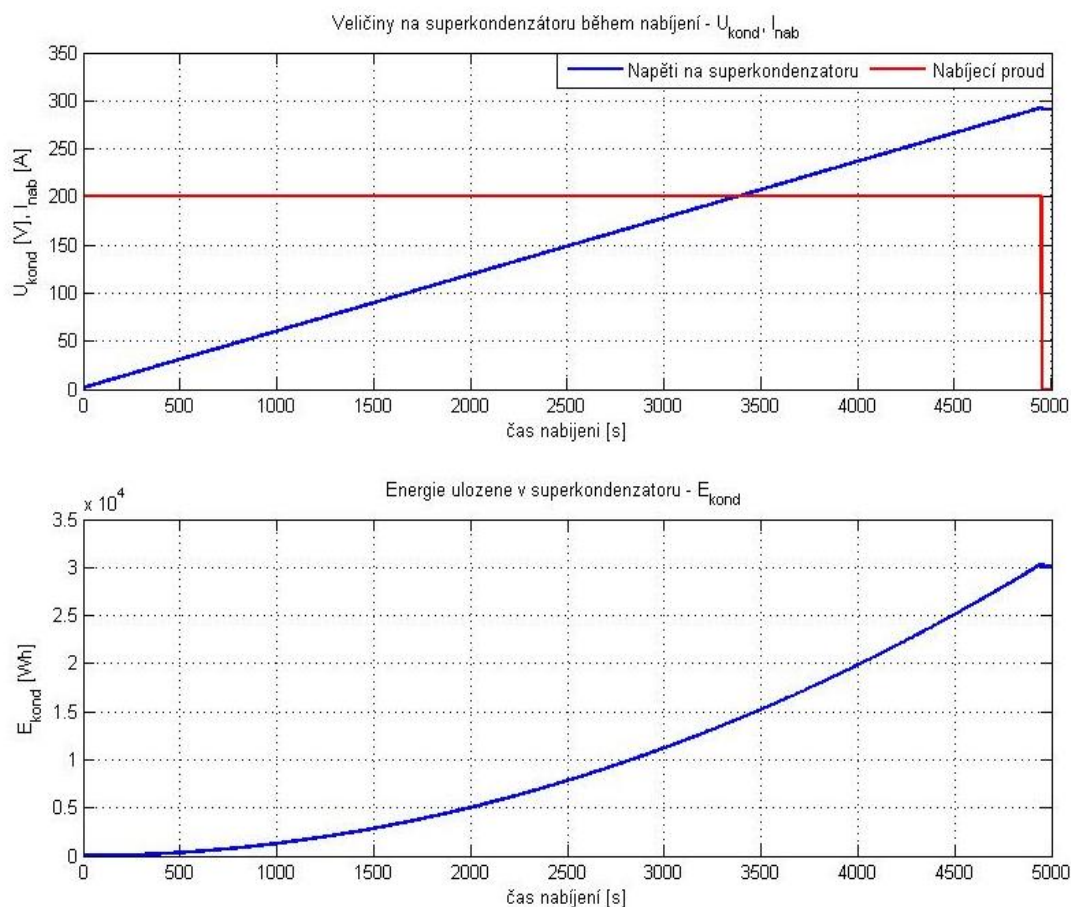
Parametr	Značený	Velikost
Hmotnost vozidla	m_v	1000 kg
Hmotnost rotačních hmot	m_r	60 kg
Poloměr kola	r_k	0,28 m
Čelní plocha vozidla	S_x	1,8 m ²
Převodový poměr	N	2
Účinnost převodovky	η	0,85 %
Součinitel valivého odporu	f_k	0,02
Součinitel odporu vzduchu	c_x	0,4
Měrná hmotnost vzduchu	ρ	1,25 kg/m ³
Gravitační zrychlení	g	9,81 m/s ²

5 SIMULACE PRŮBĚHŮ

V první řadě byl nasimulován průběh nabíjení superkondenzátoru, aby bylo možné jej následně vybíjet během jízdy vozidla. Následně se simulovaly různé způsoby jízdy vozidla. Provedené simulace jsou podrobně popsány v kapitole 6. Analýza provedených simulací.

5.1 Nabíjení superkondenzátoru

Dle vypočtených a zvolených parametrů v kapitole 4.2 byl nastavený model superkondenzátoru a byla provedená simulace, která zobrazuje proces nabíjení.



Graf 2. Nabíjení superkondenzátoru

5.2 Simulace jízdy

Pro simulace jízdy byly zvoleny čtyři různé děje a to rozbíhání vozidla, brzdění vozidla, udržování konstantní rychlosti vozidla po vozovky s měnícím se sklonem a simulace dojezdové vzdálenosti vozidla.

Pro simulace rozjezdu a brzdění vozidla byly zvoleny čtyři různé nastavení modelu. Nastavily se dvě hodnoty požadovaného zrychlení vozidla a_x a dvě hodnoty pro poměr převodovky N (převod mechanických otáček z motoru PMSM na kolo vozidla).

Zvolené kombinace nastavení modelu a jejich značení na grafech jsou vyjmenovány v tabulce 10.

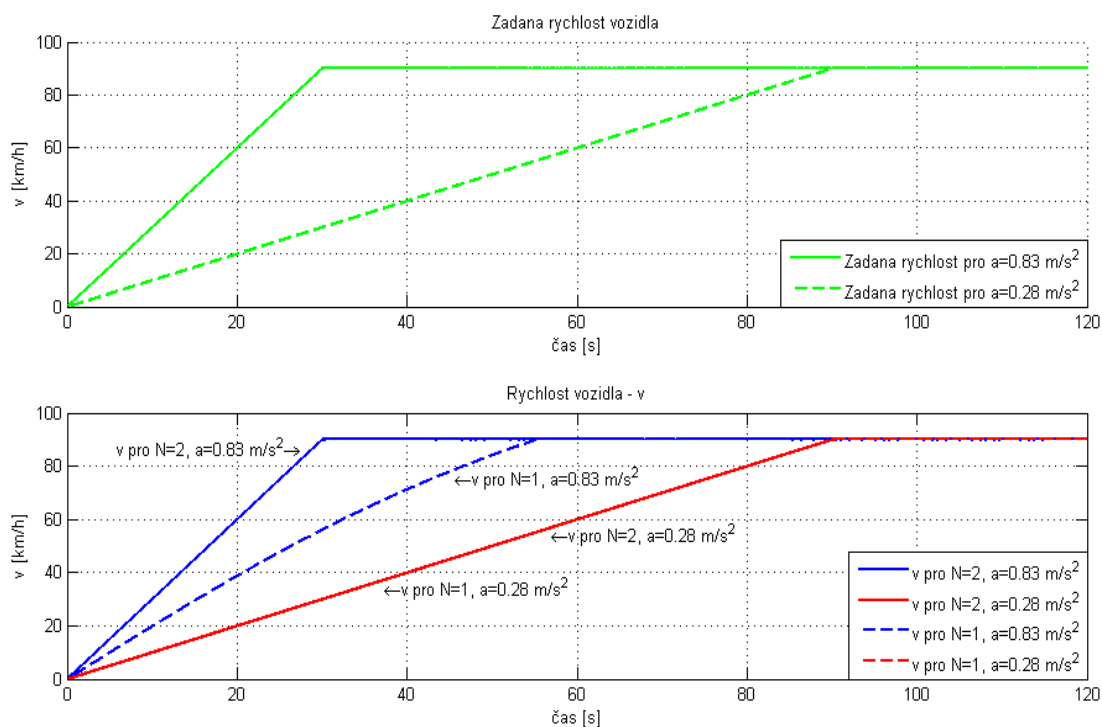
Tabulka 10. Kombinace nastavení modelu pro simulace rozjezdu a brzdění

Žádané zrychlení a_x		Převodový poměr N	Značení na grafech
1.	$a_x = 0,83 \text{ m.s}^{-2}$	N = 2	Plně modrý průběh
2.	$a_x = 0,28 \text{ m.s}^{-2}$	N = 2	Plně červený průběh
3.	$a_x = 0,83 \text{ m.s}^{-2}$	N = 1	Přerušeno modrý průběh
4.	$a_x = 0,28 \text{ m.s}^{-2}$	N = 1	Přerušeno červený průběh
Značení žádané rychlosti vozidla pro zrychlení na grafech			
$a_x = 0,83 \text{ m.s}^{-2}$			Plně zelený průběh
$a_x = 0,28 \text{ m.s}^{-2}$			Přerušeno zelený průběh

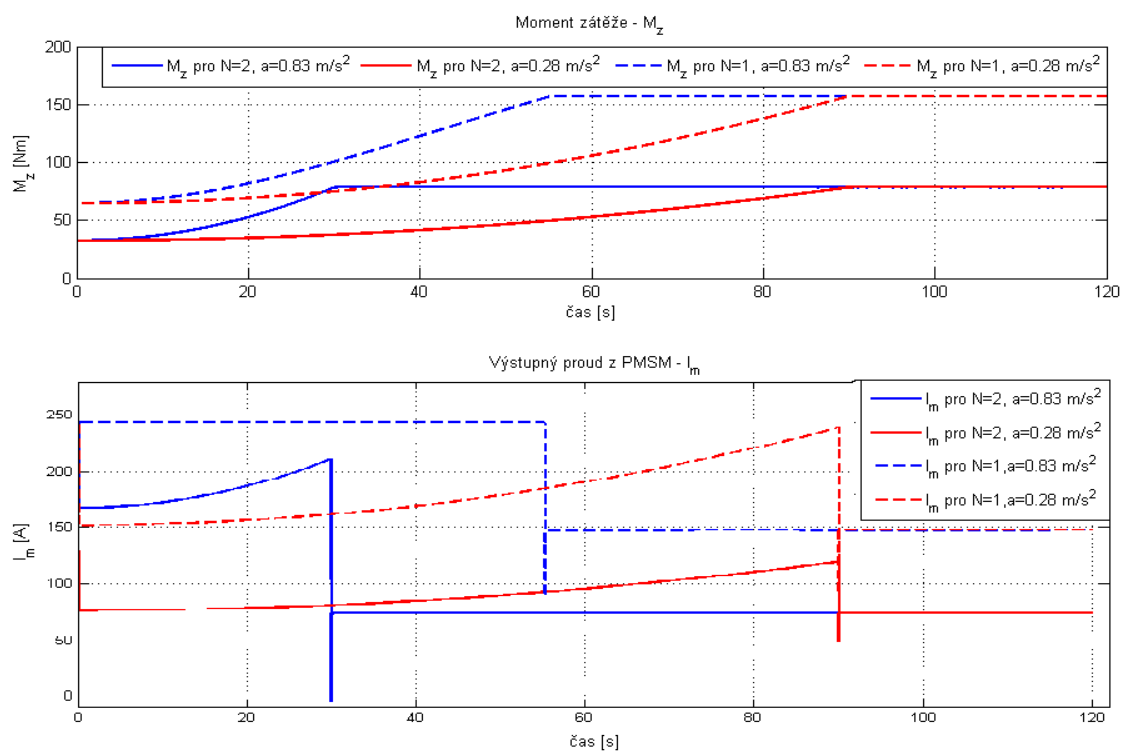
Pro simulace rozjezdu a brzdění vozidla jsou vykresleny následné zvolené veličiny modelu:

- žádaná rychlost vozidla,
- rychlost vozidla v ,
- velikost momentu zátěže M_z způsobené vozidlem na motor PMSM,
- výstupný proud z motoru PMSM I_m ,
- napětí na superkondenzátoru U_{kond} ,
- hodnota uložené energie v superkondenzátoru E_{kond} .

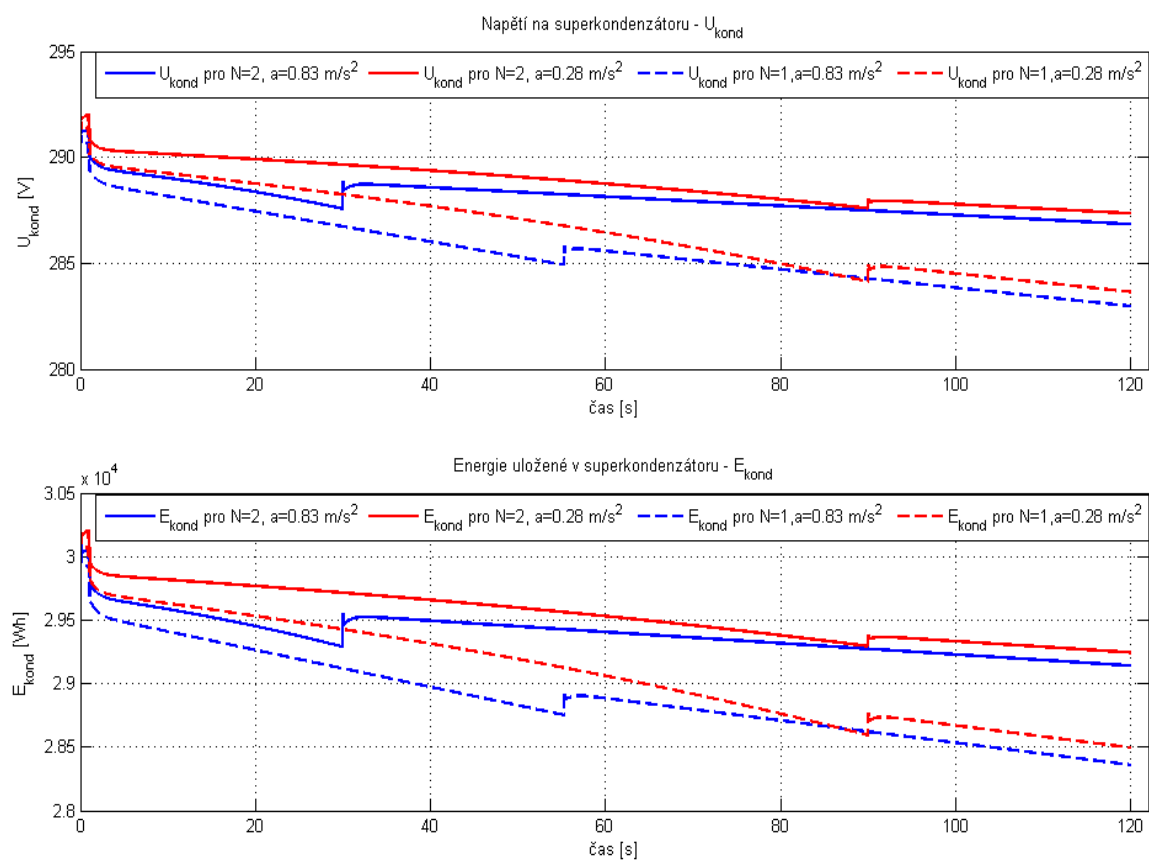
5.2.1 Rozjezd vozidla



Graf 3. Průběh žádané rychlosti a rychlosti vozidla v během rozjezdu



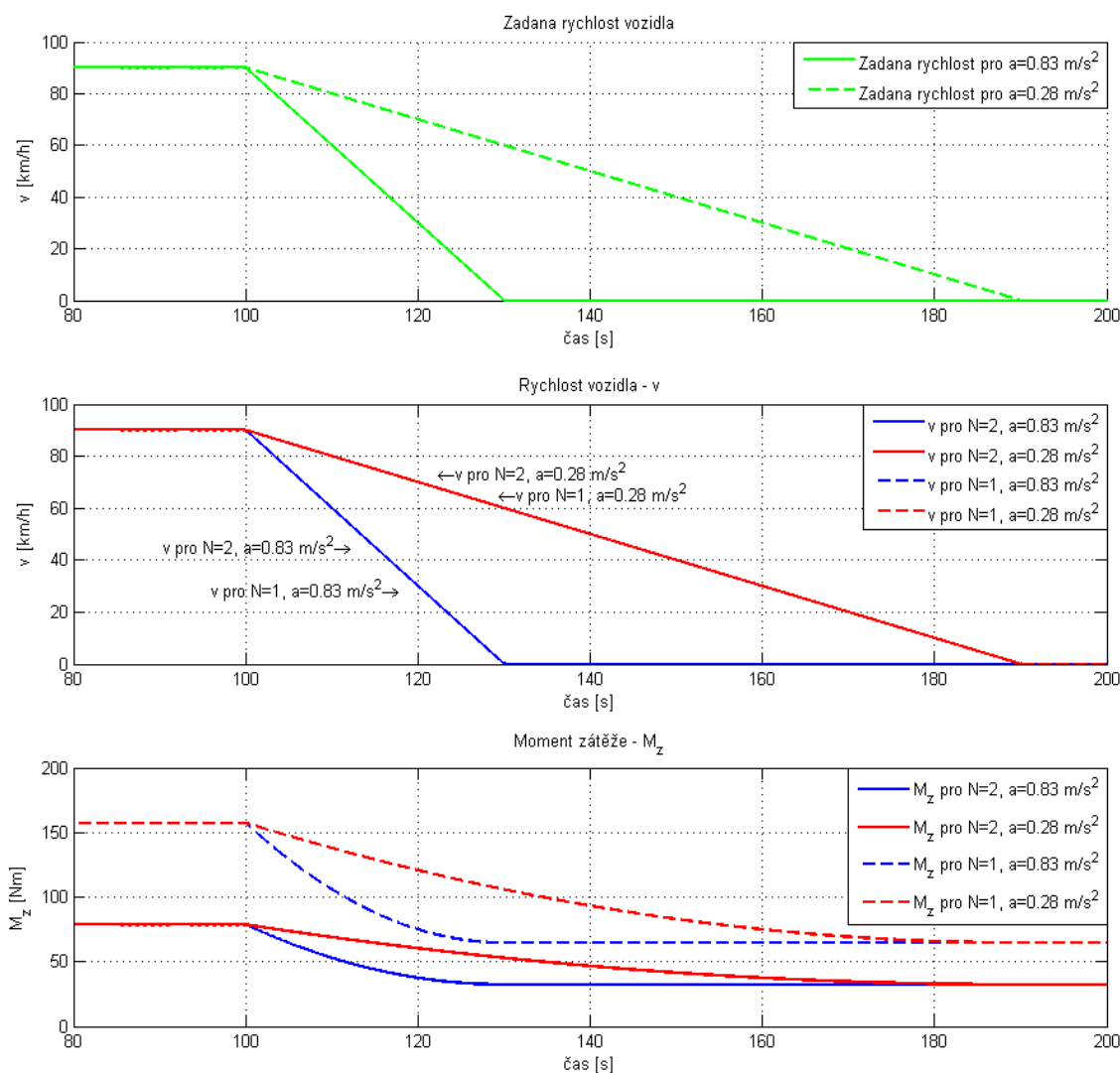
Graf 4. Průběh zátěžového momentu M_z a proudu motoru PMSM I_m během rozjezdu vozidla



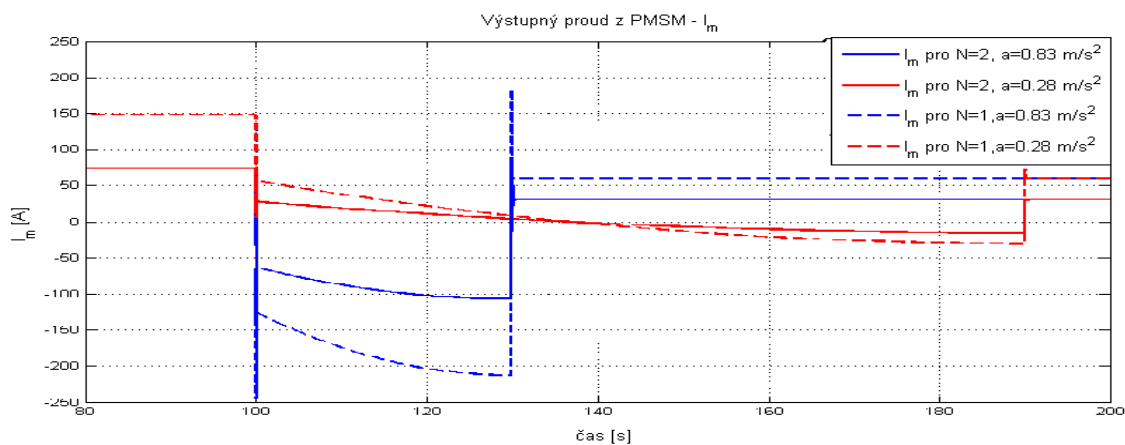
Graf 5. Průběhy veličin na superkondenzátoru během rozjezdu vozidla

5.2.2 Brzdění vozidla

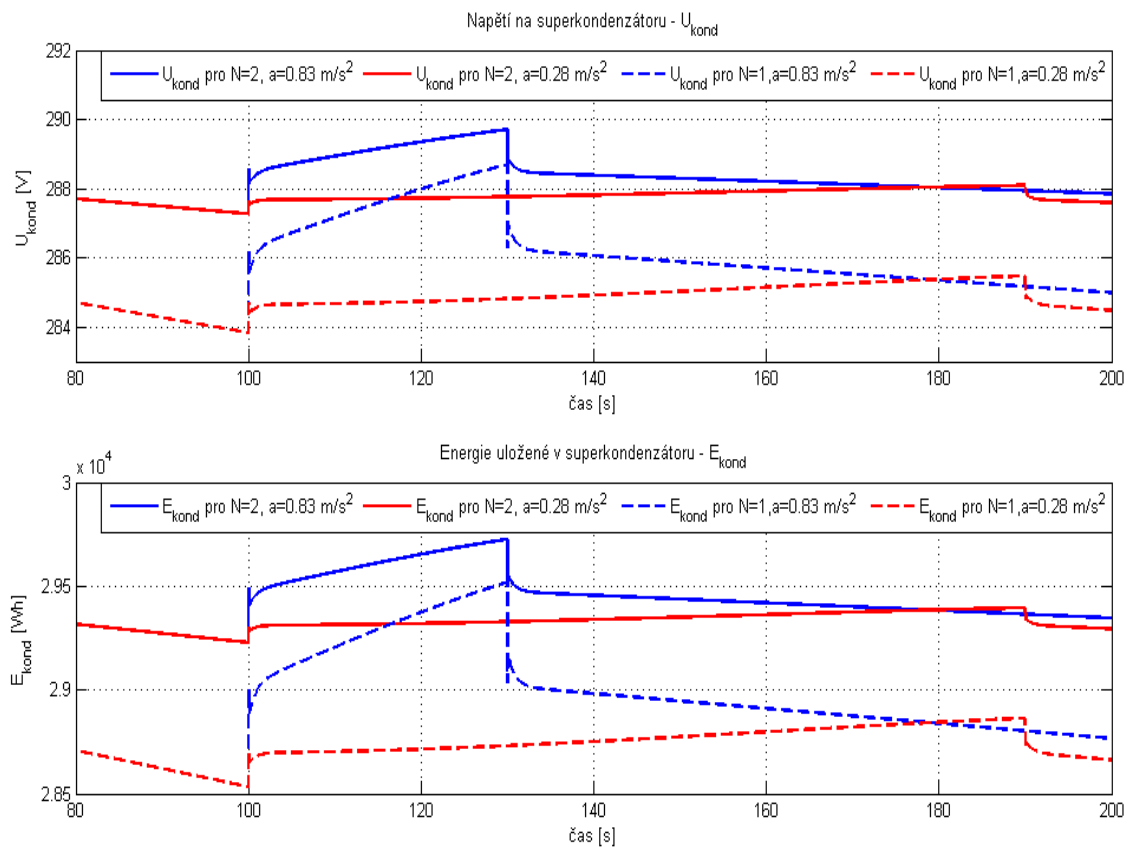
Brzdění vozidla bylo simulováno z počáteční rychlosti vozidla $v = 90 \text{ km/h}$.



Graf 6. Průběhy žádaných rychlostí, rychlosti vozidla v a momentu zátěže M_z působící na pohon vozidla během brzdění



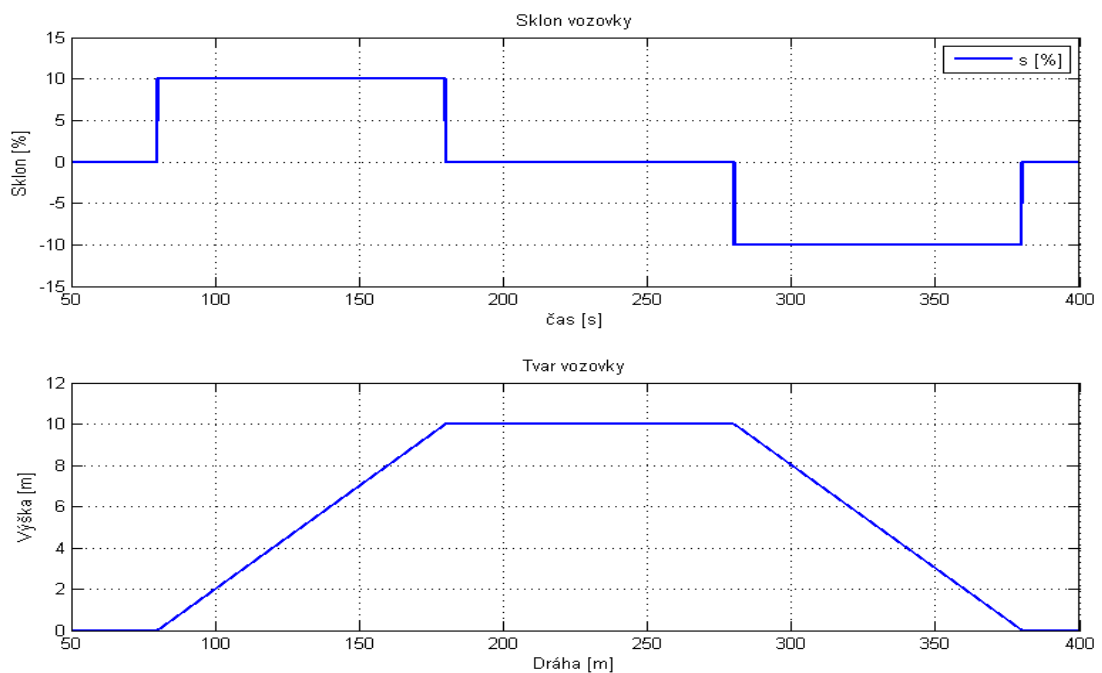
Graf 7. Průběh proudů motoru PMSM I_m během brzdění vozidla



Graf 8. Průběhy veličin na superkondenzátoru během brzdění vozidla

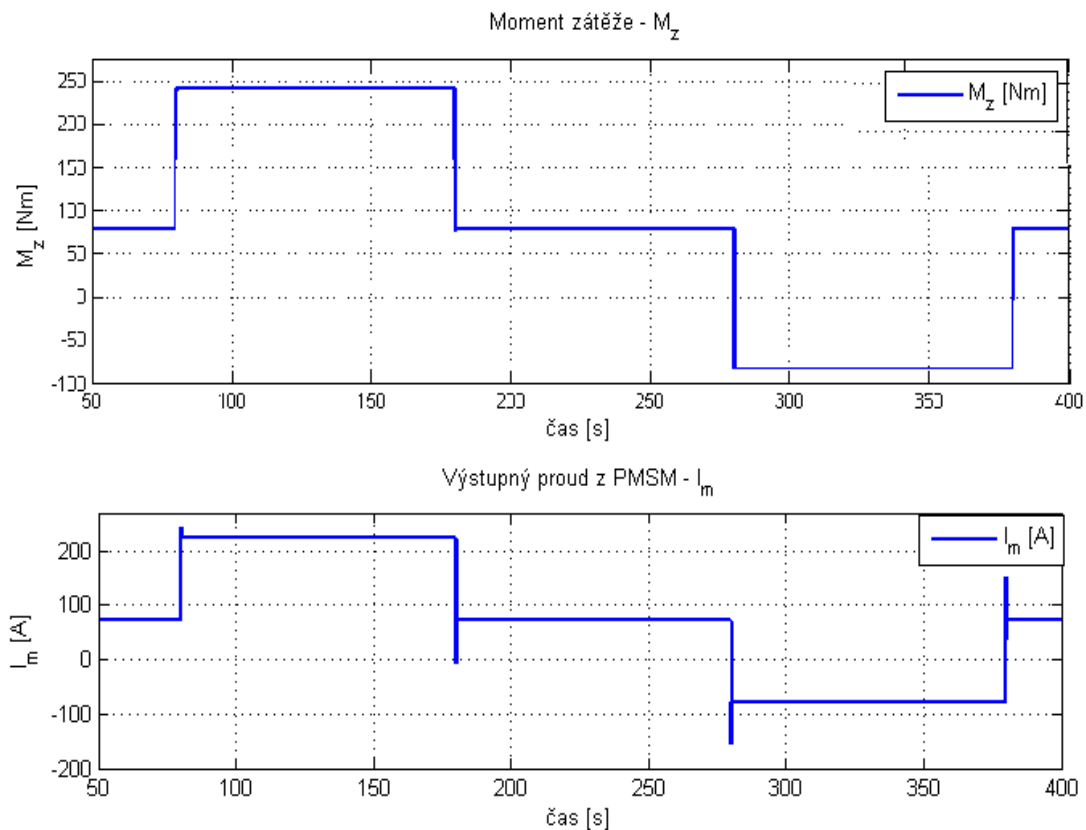
5.2.3 Jízda po vozovky se sklonem

Pro tuto simulace byl zvolen tvar vozovky se sklonem, co je zobrazeno na grafu 9.

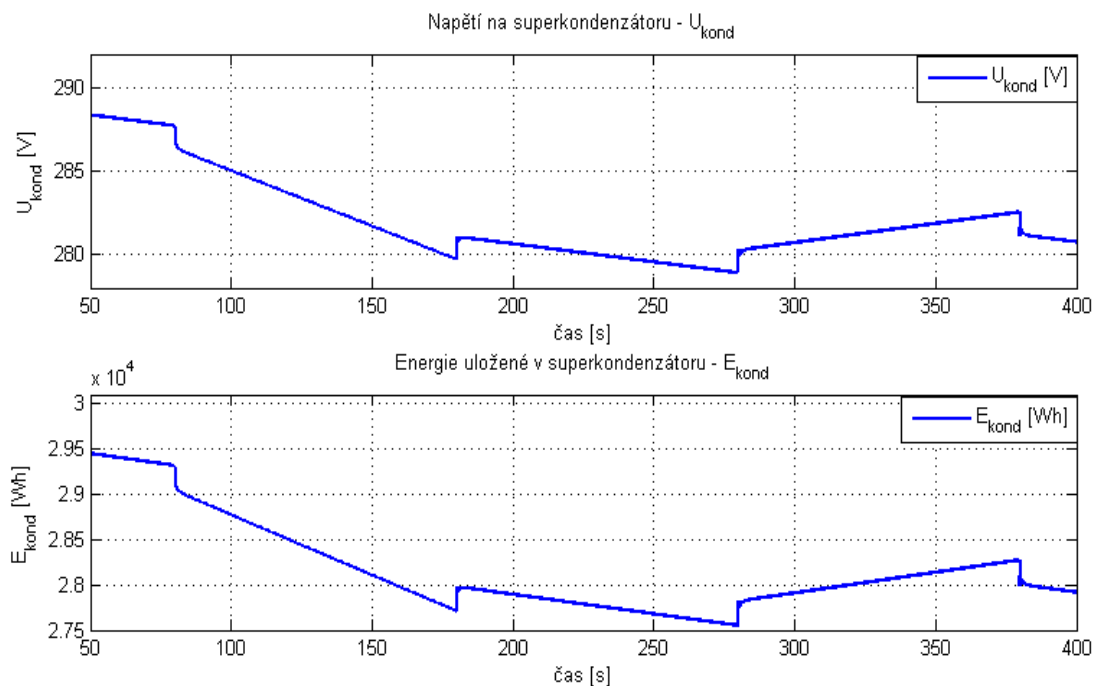


Graf 9. Průběh sklonu vozovky a tvaru vozovky

Průběhy zátěžového momentu M_z , a proudu z motoru PMSM I_m a veličin na superkondenzátoru jsou vykresleny níže.



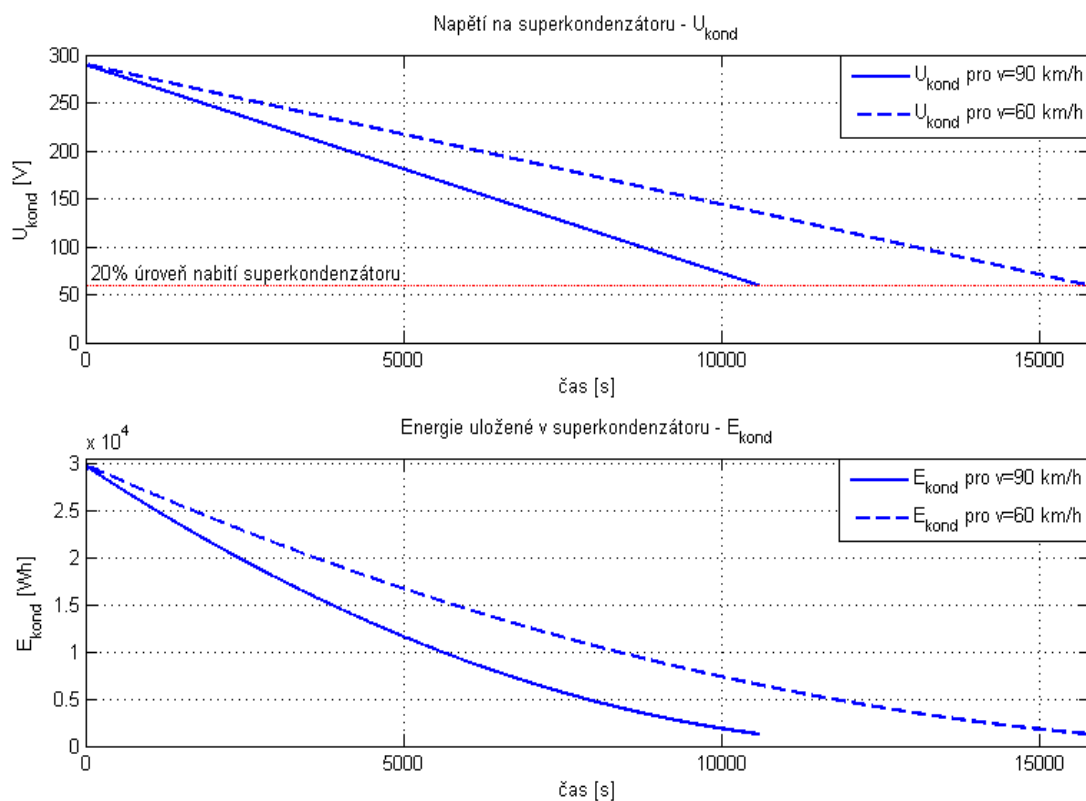
Graf 10. Průběh zátěžového momentu M_z po nakloněné vozovce a proudů motoru PMSM I_m během jízdy vozidla po nakloněné vozovce



Graf 11. Průběh veličin na superkondenzátoru jízdy po nakloněné vozovce

5.2.4 Maximální dojezd vozidla

Pro simulování maximálního dojezdu vozidla byly stanoveny podmínky vybití superkondenzátoru. Na základě těchto podmínek byly provedeny simulace. Průběhy veličin na superkondenzátoru během simulací maximálního dojezdu vozidla jsou zobrazeny na grafu 12.



Graf 12. Průběh veličin na superkondenzátoru během simulací maximálního dojezdu vozidla.

6 ANALÝZA PROVEDENÝCH SIMULACÍ

V této kapitole jsou blíže popsány zobrazené průběhy veličin na grafech v kapitole 5. Simulace průběhů.

6.1 Analýza nabíjení superkondenzátoru

Na grafu 2. lze vidět, že superkondenzátor s kapacitou $C = 3400F$, je nabíjený pomocí konstantního proudu s hodnotou 200A. Prvek se nabije na hodnotu napětí blízké 300V za 5000 vteřin, což činí cca 1 hodinu a 23 minut.

Na dolním průběhu lze vidět hodnotu uložené energie na prvku. Stejně jak i podle výpočtu v kapitole 4.2. hodnota uložené energie v superkondenzátoru činí 30kWh.

6.2 Analýza simulaci jízdy

6.2.1 Analýza rozjezdu

Rozjezd vozidla byl simulován s dvěma různými požadovanými hodnotami zrychlení a_x a s dvěma hodnotami poměru převodovky N . Kombinace nastavení hodnot zrychlení a poměru převodovky jsou vyjmenovány v tabulce 10.

Na grafu 3. nahoře lze vidět průběh žádané rychlosti vozidla a dolů je vykreslený průběh rychlosti vozidla v závislosti na čase během rozjezdu.

Na grafu 4. nahoře je zobrazena změna momentu zátěže M_z , která působí na pohon vozidla během rozjíždění. Lze vidět, že dokud rychlost vozidla v roste lineárně během rozjíždění, zátěžový moment M_z mezitím roste kvadraticky.

U třech průběhů zvolených nastavení se rychlost vozidla zvyšuje dle žádané hodnoty. V případě, kdy je žádané zrychlení vozidla $a_x = 0,83m.s^{-2}$ a převodový poměr $N = 1$, se vozidlo zrychluje pomaleji, než je požadováno. Tento děj je zapříčiněn proudovým omezením. U regulátoru otáček je omezená výstupná veličina z regulátoru, co způsobuje omezení výstupního proudu I_m z motoru PMSM. Toto omezení je popsáno v kapitole 4.4.6. a je viditelné na grafu 4. dolů, kde je zobrazený průběh výstupního proudu motoru PMSM I_m .

Během konstantní rychlosti vozidla je proudový odběr motoru I_m konstantní (75A a 150A). Ale během rozjezdu proudu z motoru PMSM dosáhne proud 1,5násobek této konstantní hodnoty. Konstantní hodnota proudu I_m během jízdy je nižší než jmenovitý proud motoru (viz Tabulka 8.) čili motor s těmito parametry (viz Tabulka 8.) by byl vhodný pro udržování konstantní rychlosti vozidla, které generuje vyšší zátěž M_z na pohon (v tomto případě například vozidlo s vyšší hmotností m_v).

Na grafu 5. jsou zobrazeny průběhy veličin napětí U_{kond} a energie E_{kond} na superkondenzátoru. Z průběhů klesání energie E_{kond} lze určit, že během pomalejšího

zrychlení ($a_x = 0,28 \text{ m.s}^{-2}$) na rychlost ($v = 90 \text{ km/h}$) se ušetřilo 90Wh energie při daných parametrech vozidla (rozdíl mezi plně modrou a plně červenou křivkou v čase 95 vteřin simulace). Během zrychlení poklesne hodnota energie na článku minimálně o 400Wh a maximálně o 900Wh. Hodnoty opotřeбенé energie závisí od převodového poměru převodovky N . Pokud je převodový poměr N vyšší, vozidlo potřebuje méně energie na rozjezd.

6.2.2 Analýza brzdění

Během brzdění vozidla pracuje elektrický pohon PMSM v generátorovém režimu. V tomto režimu transformuje kinetickou energii vozidla na elektrickou a následně ji akumuluje v superkondenzátoru.

Stejně jako v kapitole 5.2.1. u rozjezdu u brzdění jsou uvažovány dvě velikosti zpomalení $-a_x$ (záporné zrychlení) a dvě hodnoty poměru převodovek N dle tabulky 10.

V čase 100 vteřin u simulace začíná brzdění vozidla, co lze vidět z průběhů žádané rychlosti na grafu 7.nahoře. Na grafu 6. uprostřed je zobrazený průběh rychlosti vozidla, co udržuje žádanou rychlost. Na stejném grafu dolů je zobrazený průběh zátěžového moment motoru M_z během brzdění.

Na grafu 7.. jsou zobrazeny průběhy proudů z motoru PMSM I_m . Záporné hodnoty proudu symbolizují, že motor pracuje v generátorovém režimu.

Na zobrazených průběhů napětí U_{kond} a energií E_{kond} na superkondenzátoru (viz Graf 8.) lze vidět prudké změny hodnot v časech, kdy se mění smysl (orientace) výstupního proudu z motoru PMSM I_m (viz. Graf 7.). Tyto změny jsou způsobeny hlavně prudkou změnou proudu motoru PMSM I_m a zbytkovými proudy na elektrických prvcích (například v modelu superkondenzátoru na prvku $C1$).

Z průběhu křivky energie E_{kond} (Graf 8. spodní průběh) lze vidět, že během brzdění vozidla z rychlosti 90km/h až do zastavení byla akumulovaná kinetická energie zpátky do superkondenzátoru (minimum 90Wh a maximálně 500Wh). Tyto hodnoty energií závisí od nastavení převodovky stejně jak i rozjezdu vozidla. Ale během rekuperace energie platí čím nižší je hodnota převodového poměru N , tím víc energií je akumulováno zpátky do ultrakapacitoru.

Rozdíl opotřeбенé energie během rozjezdu vozidla na rychlost 90km/h a rekuperované energie během brzdění z této rychlosti až po zastavení je kolem 300Wh. Tato energie byl použita pro překonání odporových sil, které působí na vozidlo během jízdy (odpor valivý na pneumatiku vozidla, odpor vzdušní, odpor zrychlení). Představuje také i ztráty na elektrických prvcích v motoru PMSM, v superkondenzátoru (v tomto případě na odporu R_z , který představuje ztráty během nabíjení a vybíjení) a v mechanických částech soustavy (například v převodovce).

6.2.3 Analýza jízdy po nakloněné vozovce

Pro simulace jízdy po vozovce s měnícím se sklonem byla nastavena konstantní rychlost vozidla na 90km/h. Po dosažení žádané rychlosti vozidla se změnilo sklon vozovky s (v čase simulace 80s a 280s). Pro simulaci po nakloněné vozovce byl uvažován převodový poměr $N = 2$.

Na grafu 9. nahoře je zobrazena změna sklonu vozovky s , kde lze vidět, že v čase 80 vteřin se hodnota sklonu vozovky změnila na +10%. Z tvaru vozovky na dolním průběhu na grafu 9. lze vidět změnu výšky vozovky závislou od dráhy. Graf 10. zobrazuje změnu zátěžového momentu M_z , který je způsobený sklonem vozovky s . Zvýšení sklonu vozovky zvýšilo zátěžový moment pohonu M_z o 160 Nm. Na grafu 11. lze vidět, že během jízdy vozidla po nakloněné rovině se zvýšil proud pohonu PMSM až o 150A.

Z vykresleného průběhu energie na superkondenzátoru (viz Graf 11.dolní průběh) lze vidět, že během 100 vteřinové jízdy (čas mezi 80. a 180. vteřinou) po nakloněné rovině se opotřebovalo více jako 1kWh energie. Poté následovala časově stejně dlouhá jízda po vodorovné rovině, kde se opotřebovalo cca 500Wh. V třetí části jízdy směrem dolů po nakloněné rovině motor PMSM začínal pracovat v generátorovém režimu. Za 100 vteřinovou cestu směrem dolu po nakloněné rovině se během jízdy zpětně naakumulovalo zhruba 450Wh energie do superkondenzátoru. Tato hodnota tvoří 45% hodnoty, co bylo opotřebováno během jízdy směrem nahoru po nakloněné rovině. Rozdíl energií je tvořený energetickými ztrátami a energií pro překonání odporových sil hlavně odporu stoupání.

6.2.4 Analýza maximálního dojezdu vozidla

Pro určení maximálního dojezdu vozidla byla zvolena hodnota maximálního dovoleného vybití superkondenzátoru. Tato hodnota byla zmíněna v kapitole 4.2. konkrétně v tabulce 5. Úroveň vybití superkondenzátoru u elektrických vozidel se pohybuje kolem 20-30%. Maximální dojezd vozidla je předpokládán v případě, kdy napětí na superkondenzátoru U_{kond} poklesne na hodnotu 60V.

Pro simulaci byly zvolené dvě rychlosti $v_1 = 60 \text{ km/h}$ a $v_2 = 90 \text{ km/h}$. Graf 12 zobrazuje průběh veličin superkondenzátoru U_{kond} a E_{kond} během simulací maximálního dojezdu vozidla.

U různých rychlostí působí odlišný zátěžový moment M_z na pohon vozidla, co způsobuje odlišný čas vybití superkondenzátoru. V tabulce 11. jsou zapsány hodnoty momentu zátěže M_z , čas vybití, dojezd vozidla a opotřebovaná energie pro jízdu.

Tabulka 11. Maximální dojezd vozidla

Rychlost vozidla v [km/h]	M_z [Nm]	Čas vybití na 20% [h:min]	Dráha [km]	Použitá energie [kWh]
60 km/h	53 Nm	4h 22 min	262 km	28,3
90 km/h	79 Nm	2h 56 min	264 km	28,2

Z tabulky 11. lze vidět, že během rychlosti 60km/h, která je o třetinu nižší jako rychlost 90km/h, se snížil i zátěžový moment motoru M_z o třetinu. Toto snížení zátěže prodloužilo čas jízdy, avšak výslednou projetou vzdálenost ovlivnilo minimálně (záporně).

Lze říct, že energie uložena v ultrakapacitoru s parametry uvedenými v tabulce 7. je postačující na 264km dojezd elektrického vozidla s parametry uvedenými v tabulce 9. za stanovené podmínky.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá elektrickými prvky používanými v elektromobilech. Úvodní kapitola popisuje a porovnává typy elektrických a hybridních vozidel. V následných dvou kapitolách jsou popsány aktuálně aplikované úložiště energie a elektrické stroje pro elektrická vozidla.

Po zpracování literárních rešerší byly vybrány prvky pro modelování. Hlavní částí diplomové práce je vytvoření modelu elektrického vozidla se zdrojem energie a pohonem a provedení simulace jízdy.

Jako zdroj elektrické energie pro vozidlo byl vybrán prvek superkondenzátor. Mezi jeho hlavní výhody vůči akumulátoru patří větší počet životných cyklů (nabíjení a vybíjení) a větší hmotnostní a objemová hustota energie. V současné době se používá hlavně jako doplňkový zdroj energie pro akumulování energie během rekuperačního brzdění vozidla. Jako pohon elektrického vozidla byl zvolen synchronní motor s permanentním magnetem (PMSM). Tento typ motoru a jeho různé modifikace jsou nejvíce používány pro automobilové aplikace a to hlavně kvůli jejich výkonům a efektivnosti.

Matematický popis PMSM byl transformován do souřadnicové soustavy dq . Spolu s matematickým popisem superkondenzátoru byl vytvořen model v programu MATLAB/Simulink. Pro vozidlo byly určeny odporové síly, pomocí kterých je vozidlo v modelu představováno jako zátěž elektrického pohonu. Pro stanovení parametrů modelu byly provedeny simulace jízdy vozidla, které byly následně popsány a vyhodnoceny hlavně ze stránky spotřeby a rekuperace energie na superkondenzátoru.

Pomocí simulací bylo zjištěno, že vozidlo s hmotností $1\,000\text{kg}$ potřebuje pro projezd vzdálenosti 260km zhruba $28,3\text{kWh}$ energie. Toto množství energie je možné uschovat do superkondenzátorového bloku s kapacitou $3\,400\text{F}$ a s hmotností $55,1\text{kg}$. Je potřeba připomenout, že během simulací byly zanedbané jevy, které způsobují ztráty energie. Například ztráty energie v elektrických obvodech nebo v mechanické části vozidla. Tyto ztráty by výslednou hodnotu projedené vzdálenosti snížili.

Pro následné rozšíření práce by bylo vhodné doplnit rekuperační obvod pro nabíjení a vybíjení superkondenzátoru a trojfázový měnič napětí pro napájení pohonu PMSM. Popřípadě se u PMSM více zabírat problematikou odbuzování. Po doplnění práce s vyjmenovanými částmi by simulace jízd byly reálnější.

LITERATURA

- [1] K.T., Chau a Wenlong LI. *Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles*. International Journal of Vehicle Design: Automotive and Transportation Systems and Design and Product Development. 2014, roč. 64, č. 1, s. 25. DOI: 10.1504/ IJVD.2014.057775.
- [2] BÍLÝ, L. *Simulační modely elektrických pohonu vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D.
- [3] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Soudní inženýrství. 2004, roč. 15, č. 4, s. 13. ISSN: 1211-443X. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-04-212-224.pdf>
- [4] BURKE, Andy. *Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vehicles*. Institute of Transportation Studies. 2009, s. 29. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/9p18x8s8#page-29>
- [5] HABA, R. *Stanice na cyklování baterií a superkondenzátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 80s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Dvořák
- [6] BILKO, R. *Příčiny předčasné ztráty kapacity olověných akumulátorů pracujících v PSoC režimu hybridních elektrických vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 91 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
- [7] ČECH, T. *Zkoumání vlivu přetížení na životnost olověných akumulátorů pro hybridní elektrická vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
- [8] JOHANSSON, PATRIK a BJÖRN ANDERSSON. *Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling: Model Creation and Verification*. Master of Science Thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Gothenburg, Sweden, 2008. Dostupné z: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/AnderssonJohanssonMSc.pdf>
- [9] BILL, J. *Superkondenzátory s kapalnými aprotickými elektrolyty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marie Sedlářiková, CSc.
- [10] KOŇARIK, R. *Řízení synchronního servomotoru v klouzavém režimu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.
- [11] KACHLÍK, J. *Model elektrického vozidla v programu SIMULINK/SIMSCAPE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík.
- [12] HOŘAVA, J. *Skalární versus vektorové řízení synchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 42s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Hubík.

- [13] PETRUŠKA, Lubomír. *Model synchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60s., 1 příloha. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Veselý.
- [14] MALIŠ, Martin. *Algoritmy bezsnímačového řízení pohonu se synchronním motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 110s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.
- [15] DUDA, V. *Využití superkapacitorů v trakčních pohonech*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2010. 64s. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.
- [16] MAXWELL TECHNOLOGIES. *Product Comparison Matrix*. 2014, 2s. Dostupné z: http://www.maxwell.com/images/documents/Product_Comparison_Matrix_3000489_2.pdf
- [17] FAJKUS, P. *Matematický model synchronního motoru s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 82s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Huták, Ph.D.
- [18] SKALICKÝ, J. *Teorie řízení*. Učební text FEKT VUT v Brně. 2002, 103s.
- [19] VESELÝ, L. *Algoritmy bezsnímačového řízení synchronního motoru s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 122s. Vedoucí disertační práce byl doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.
- [20] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory : hnací charakteristika : brzdění : odpruženost : říditelnost, ovladatelnost : stabilita*. 1. vyd. Brno: VLK, 2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.

POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY

EV	- elektromobil, elektrické vozidlo	- Electric Vehicles
BEV	- elektromobil, elektrické vozidlo	- Battery Electric Vehicles
HEV	- hybridní vozidlo	- Hybrid Electric Vehicle
FCEV	- elektromobily s palivovým článkem	- Fuel Cell Electric Vehicles
PHEV	- dobíjitelé hybridní vozidlo	- Plug-In Hybrid Electric Vehicle
REEV	- HEVs prodloužením dojezdem	- Range-Extended Electric Vehicle
ISG	- integrovaný startovací generátor	- Integrated – Starter – Generator
EVT	- elektrická variabilní převodovka	- Electric Variable Transmission
VRLA	- akumulátor s regulačním ventilem	- Valve Regulated Lead Acid batterie
AFC	- alkalické články	- Alkaline Fuel Cells
PEFC	- alkalické články s tuhými polymery	- Proton Exchange Fuel Cells
PAFC	- alkal. články s kyselinou fosforečnou	- Phosphoric Acid Fuel Cells
MCFC	- alkal. články s roztavenými uhličitany	- Molten Carbonate Fuel Cells
SOFC	- alkalické články s tuhými oxidy	- Solid Oxide Fuel Cells
EDLC	- elektrické dvojvrstvé kondenzátory	- Electric Double-Layer Capacitors
ss	- stejnosměrné	
EMF	- elektromotorického napětí	- Electromotive force
VVVF	- řízení pomocí frekv. měniče	- Variable-Voltage Variable- Freq.
FOC	- vektorové orientované řízení	- Field-Oriented Control
CCC	- řízení proudu pomocí vlnění	- Current Chopping Control
APC	- řízení pomocí přepínání fází	- Angular Position Control
PMSM	- synchronní motor s permanentním magnetem	
PM	- permanentní magnet	
DC	- stejnosměrný proud	- Direct Current
AC	- střídavý proud	- Alternating Current
BL	- střídavý	- brushless
BLAC	- typ PMSM	- Brushless AC motor
BLDC	- typ PMSM	- Brushless DC motor
VR PM	- stroje s proměnlivým mag. odporem	- Variable Reluctance PM machine
DSPM	- typ statorového PM motoru	- Doubly Salient PM machines
FRPM	- typ statorového PM motoru	- Flux-Reversal PM machines
FSPM	- typ statorového PM motoru	- Flux-switching PM machines
FCPM	- typ statorového PM motoru	- Flux-Controllable PM machine
MMF	- magnetomotorické síly	- Magnetomotive force
VPM	- Vernier PM motory	- Vernier PM machine
TFPM	- typ motoru VR PM	- TFPM machine
FMPs	- označený typu statorů	- Flux-Modulation Poles

E	- energie	[Wh], [J]
C	- kapacita	[F]
U,u	- napětí	[V]
I,i	- proud	[A]
R	- odpor	[Ω]
Q	- elektrický náboj	[C]
P	- výkon	[W]
Φ, Ψ	- magnetický tok	[Wb]
L	- indukčnost	[H]
B	- magnetické indukce	[T]
M	- moment	[Nm]
f	- frekvence	[Hz]
α	- úhel	[°]
ϵ_0	- permitivita vakua	$8,89 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
S	- plocha elektrod	[m ²]
S_x	- čelní plocha vozidla	[m ²]
d	- vzdálenost elektrod	[m]
h,l	- délka, výška	[m]
r	- poloměr	[m]
ω	- úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
n	- otáčky	[ot/min]
γ	- úhel mezi fázemi	[rad]
ϑ	- poloha rotoru	[rad]
J	- moment setrvačnosti	[kg.m ²]
K_E	- konstanta motoru	[V.s]
F	- síla	[N]
O	- odpor působící na vozidlo	[N]
G	- tíha	[N]
N	- převodový poměr	[-]
f_k	- součinitel valivého odporu	[-]
k	- počet	[-]
p_p	- počet pólových dvojíc	[-]
c_x	- součinitel odporu vzduchu	[-]
ϵ_r	- relativní permitivita materiálu	[-]
C_m	- mechanická konstanta motoru	[-]
K_x	- zesílení přenosu v Laplaceově transf.	[-]
η	- účinnost	[%]
g	- gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
a	- zrychlení	[m.s ⁻²]
v	- podélná rychlost	[m.s ⁻¹]

m	- hmotnost	[kg]
ρ	- měrná hmotnost vzduchu	[kg.m ⁻³]
T_x	- časová konstanta přenosu	[s]
$F(p)$	- přenosy v Laplaceově transformaci	
p	- Laplaceův operátor	
a,b,c	- indexy fázových veličin	
α,β,d,q	- indexy v daných souřadnicových systémech	

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: CD s obsahem:

- [1] Model v programu Simulink
- [2] Zdrojový kód v programu Matlab
- [3] Elektronická verze diplomové práce