



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra elektrických pohonů a trakce (K13114)**

Model pohonu elektromobilu

Electromobile Powertrain model

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ADIP25

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Bc. Kryštof Špaček

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Kryštof Špaček**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Model pohonu elektromobilu**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši problematiky a navrhnete simulační model pro:

1. Zásobník elektrické energie pro vozidla nezávislé trakce, využívající kombinaci elektrochemického akumulátoru a superkapacitoru.
2. Elektronický měnič pro přeměnu energie a napájení elektrických pohonů vozidel.
3. Synchronní motor s permanentními magnety
4. Dle možností ověřte simulační model laboratorně

Seznam odborné literatury:

- [1] Pracovní manuál pro Matlab – Simulink
- [2] Pavelka a kol.: Výkonová elektronika, učební texty ČVUT FEL
- [3] http://www.ijareeie.com/upload/january/19_Mathematical%20Modelling.pdf

Vedoucí: doc. Pavel Mindl Ing., CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016



Anotace

Cílem této práce je vytvoření kompletního modelu elektromobilu pro potřeby určení spotřeby elektrické energie a potažmo i dojezdu elektromobilu na základě známých parametrů. Vstupními parametry pro tento model jsou: rychlostní profil, výškový profil (respektive profil různého stoupání v daném úseku jízdy) a další. V modelu je zahrnut i model akumulátoru, který respektuje jeho životnost na základě počtu nabíjecích cyklů, době skladování, teplotě skladování atd. Model obsahuje i superkapacitor pro výhodnější rekuperaci a lepší dynamiku celého pohonu. Veškeré parametry akumulátoru, superkapacitoru a elektromotoru je možné měnit a určovat tak vhodné parametry těchto komponent pro reálný elektromobil dle požadavků konstruktéra.

Abstract

The aim of this work is to create a complete model of an electric vehicle so as to determine the power consumption and range of the vehicle based on its known parameters. The input parameters for this model are speed profile and altitude profile (i.e. the profile of height climbed and fallen, including the gradients, for a given journey), among others. The model includes a battery, the parameters of which cover lifespan based on the number of recharges, storage time, storage temperature, and so forth. The model also includes a supercapacitor favorable to energy regeneration and the improved dynamics of the whole drive. All of the parameters of the battery, supercapacitor, and electric motor can be changed to determine the most suitable combination of parameters for a real electric vehicle based on the designer's requirements.

Klíčová slova

Elektromobil, synchronní stroj s permanentními magnety, akumulátor, superkapacitor, mechanický model vozidla, DC/DC měnič, DC/AC měnič, PWM, NEDC, Simulink, Simscape.

Keywords

Electromobile (electric vehicle), permanent magnet synchronous machine (PMSM), battery, supercapacitor, mechanical model of vehicle, DC/DC converter, DC/AC converter, PWM, NEDC, Simulink, Simscape.



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Mindla, CSc. a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW apod.) uvedené v příloženém seznamu použitých zdrojů informací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze, dne 26. 5. 2016

Podpis

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Pavlu Mindlovi, CSc. za cenné rady, informace a připomínky, které mi poskytl při tvorbě této práce.



Obsah

1.	Úvod	7
2.	Pohonná jednotka	8
3.	Konstrukce a princip PMSM	8
3.1.	Stator.....	8
3.2.	Rotor.....	9
3.3.	Permanentní magnety	9
4.	Vektorové řízení	10
4.1.	Regulace.....	10
5.	Transformace souřadnicových systémů.....	11
5.1.	Clarkové transformace	11
5.2.	Parkova transformace	12
6.	Matematický model elektrického točivého stroje	14
6.1.	Parametry motoru.....	14
6.2.	Modelování	15
6.2.1.	Rovnice pro napětí v d, q systému	15
6.2.2.	Spřažené magnetické toky v d, q systému	15
6.2.3.	Vztah elektrické a mechanické úhlové rychlosti	16
6.2.4.	Pohybová rovnice v d, q systému.....	16
6.2.5.	Výpočet proudů PMSM	16
6.2.6.	Výpočet momentu a otáček PMSM	16
6.2.7.	Celkový model PMSM	17
6.2.8.	Model vektorového řízení	17
7.	Mechanický model elektromobilu	18
7.1.	Valivý odpor	18
7.2.	Odpor vzduchu	19
7.3.	Odpor stoupání	20
7.4.	Odpor zrychlení.....	21
7.5.	Výpočet momentu PMSM.....	21
8.	Elektrochemický zdroj.....	24
8.1.	LiFePO ₄ – Lithium železo fosfátový akumulátor.....	25



8.2.	BMS (Battery management system)	25
8.3.	Model akumulátoru.....	26
8.3.1.	Výstupní napětí akumulátoru.....	26
8.3.2.	Napětí naprázdno akumulátoru	26
8.3.3.	Vliv úbytku kapacity během životnosti.....	26
8.3.4.	Změna vnitřní impedance článku	28
8.3.5.	Výpočet teplotního koeficientu potenciálu článku	30
8.3.6.	Celkový model článku v MATLAB/SIMULINK.....	31
9.	Superkapacitor	33
9.1.	Princip funkce superkapacitoru.....	33
9.1.1.	Formy uhlíkových vrstev.....	34
9.1.2.	Vnitřní uspořádání.....	34
9.2.	Vlastnosti superkapacitoru.....	36
9.3.	Model superkapacitoru	37
9.3.1.	Celkový model v MATLAB/SIMULINK	38
10.	Měniče.....	39
10.1.	Zvyšovací DC/DC měnič	39
10.2.	Snižovací DC/DC měnič.....	40
10.3.	Měnič pro superkapacitor	40
10.4.	Měnič pro PMSM.....	41
10.4.1.	PWM	42
10.4.2.	Simulace měniče pro PMSM.....	44
11.	Jízdní cyklus NEDC	44
11.1.1.	Výsledný průběh NEDC.....	45
12.	Celkový model elektromobilu	45
13.	Výsledky simulací elektromobilu.....	47
14.	Závěr	51
	Seznam obrázků	52
	Seznam tabulek	54
	Seznam použitých symbolů	55
	Bibliografie – seznam použitých zdrojů informací	58



1. Úvod

V současné době je dominantním pohonem pro automobily spalovací motor, který dosahuje účinnosti zpravidla okolo 30 %, což je velkou ekologickou zátěží z hlediska globálního oteplování. Ropa je navíc vyčerpatelem zdrojem potřebné energie, je stále dražší a náročnější na těžbu. Vedle toho, že je takto cenná surovina spalována v automobilech a to ještě většinu její energie nevyužijeme, je zde aspekt ekonomický.

Řešením by mohlo být využívání elektromobilů. Řešení současné situace však není jednoduché a nebude stačit jen „přesedlat“ na automobily poháněné elektromotory. Bude třeba např. stále více využívat železniční dopravu, která je vzhledem k cestujícímu několikanásobně méně energeticky náročná. Přesto však budeme využívat mnoho automobilů. Elektromobily se tak jeví jako nejvhodnější alternativy současných automobilů. Elektromobily jsou konstrukčně jednodušší (obsahují méně pohyblivých částí), jsou však náročnější na řízení, které je však dobře zvládnuté. Synchronní stroje s permanentními magnety jako pohonné jednotky, jsou podstatně účinnější (přes 90 %) než spalovací motory. Lze pohánět bez velkých komplikací každé kolo automobilu zvlášť (není nutný klasický diferenciál, kardan, apod.). Diferenciál je pak v podstatě jen virtuální. Na základě natočení kol a jejich otáček lze řídit momenty jednotlivých synchronních strojů tak, aby byly zatáčky projížďeny s maximálním komfortem a bezpečností. Lze elektronicky řídit tah jednotlivých kol, tedy snížit podstatně riziko smyku vozidla, eliminovat prokluz všech kol nebo jen kola, které je na kluzkém povrchu (kontrola trakce) apod. Vše je pak jen otázkou vhodného HW a SW vybavení vozidla.

Energie pro pohon vozidla je, až na výjimky, uložena v akumulátorech a/nebo superkapacitorech. S tím jsou spojeny i nevýhody elektromobilů, jako je maximální dojezdová vzdálenost nebo čas potřebný k opětovnému nabití těchto zdrojů. Z důvodu bezpečnosti, životnosti (počet nabíjecích cyklů), hustoty energie a maximálního nabíjecího proudu jsou voleny akumulátory typu LiFePO_4 . Jejich parametry jsou stále zdokonalovány, a tak už nebývá až tak podstatný problém s dojezdovou vzdáleností, která může dosahovat i přes 500 km na jedno nabití a opětovné nabití na více než 80 % kapacity akumulátoru do 30 minut. V současné době jsou však vyvinuty prototypy lithium-titanátových akumulátorů (LTO), které mají ještě podstatně větší hustotu energie a podstatně větší životnost, danou nabíjecími cykly, než LiFePO_4 . Navíc díky svému technologickému provedení mají i lepší odvod ztrátového tepla.

Velmi důležitým aspektem v celé problematice ekologie elektromobilů je také způsob získávání elektrické energie, kterou jsou akumulátory nabíjeny. To je spjato i s lokalitou, kde jsou provozovány. Také záleží na tom, v jaké míře jsou např. v dané zemi zastoupeny jaderné elektrárny, obnovitelné zdroje elektrické energie, či uhelné elektrárny, se kterými jsou pak v podstatě spojeny i emise do ovzduší, které nepřímo vznikají používáním elektromobilu. Proto je důležitý pokrok i v tomto směru. Např. nabíjecí stanice napájené fotovoltaickými panely apod.

Následující práce se zabývá modelováním elektromobilu po elektrické stránce (především silnoproudé) a částečně i po stránce fyzikální, a to tak, aby bylo možné určit spotřebovanou



elektrickou energii při různých režimech jízdy (s ohledem na rychlostní profil, náklon vozovky, atd.) Koncepce elektromobilu je zvolena s ohledem na aktuálně dominantně používané řešení, a to použití synchronního stroje s permanentními magnety, LiFePO_4 akumulátoru a superkapacitoru pro pokrytí proudových špiček (při rozjezdu, akceleraci a brzdění). Model je tvořen v programu Matlab - Simulink/Simscape.

2. Pohonná jednotka

Na moderní pohony jsou kladeny vysoké nároky, a to především na vysokou spolehlivost a vysoký rozsah otáček spojený s maximální účinností v celém otáčkovém rozsahu. Dále je požadován vysoký krouticí moment, tichost a nízká cena.

Vzhledem k nevýhodám spojeným se stejnosměrnými stroji, jako jsou nutná údržba, přítomnost uhlíkového prachu a další, se tyto v elektromobilech nepoužívají. Komutátor stejnosměrných motorů je nejslabším článkem, který omezuje maximální otáčky rotoru. Je zde problém i s elektromagnetickou kompatibilitou (EMC) díky jiskření mezi lamelami komutátoru a kartáčem při komutaci stroje. Přítomnost uhlíkového prachu způsobuje vodivou vrstvu v okolí komutátoru, což také není žádoucí.

Proto se moderní pohony řeší asynchronními stroji nebo stroji synchronními s permanentními magnety. Jejich společnou nevýhodou oproti stejnosměrným strojům je náročnější řízení, které je však v současné době zvládnuté (Variable-Voltage, Variable-Frequency, Field-Oriented Control, ...). Asynchronní stroje se výhradně používají s kotvou nakrátko, a to vzhledem k jednoduché konstrukci a ceně. Mezi nejmodernější pohonné jednotky však patří synchronní stroje s permanentními magnety (PMSM). Mají vyšší účinnost oproti synchronním strojům s budícím vinutím, a to díky absenci ztrát v budícím vinutí, což přináší výhody i do tzv. tepelného managementu stroje. Odpadá problém s řešením odvádění tepla od rotoru, ztrátové teplo je třeba odvádět jen ze statorové části s vinutím a celkové nároky na chlazení jsou menší. Další výhodou PMSM je, že mají malou elektromechanickou časovou konstantu, což je příznivé z hlediska dynamiky řízení. Proto se ve své práci omezím jen na tyto stroje. Dále je výhodou PMSM velká momentová přetížitelnost.

3. Konstrukce a princip PMSM

PMSM lze ještě dělit na BLDC (Brushless DC motor) a BLAC (Brushless AC motor). V literatuře se však obvykle pro BLAC ustálila zkratka jen PMSM a BLDC se uvádějí samostatně. PMSM - BLAC (dále jen PMSM) mají pólové nástavce vyrobeny tak, aby při konstantní rychlosti bylo dosaženo harmonické magnetické indukce podél vzduchové mezery, čímž je dosaženo konstantního momentu (nepulzuje) pouze za cenu mírně snížené výkonové hustoty oproti BLDC.

3.1. Stator

Stator PMSM je prakticky shodný se státorem asynchronního stroje. Stator motoru bývá tvořen svařovanou kostrou nebo kostrou odstříknutou ze slitiny hliníku. V této kostře je upevněn



(nalisován) statorový svazek – paket s vinutím. Magnetický obvod bývá lištěný z izotropních křemíkových plechů. Vinutí bývá trojfázové, zapojené do hvězdy s posunutím fází o 120°. V čelech vinutí mohou být umístěna teplotní čidla. Vývody těchto čidel, tak jako vývody samotného statorového vinutí, bývají vyvedeny stíněnými vodiči.

3.2. Rotor

Ocelový prstenec, který bývá základem rotoru (plní úlohu magnetického obvodu, mechanické konstrukce a případně i chlazení), může být umístěn uvnitř statoru nebo vně. Pokud je rotor vně, je snazší docílit většího krouticího momentu, ale za cenu mírně nižších maximálních otáček, komplikovanější konstrukce a komplikovanějšího chlazení statoru. Na ocelovém prstenci jsou lepením připevněny permanentní magnety. Jejich uspořádání může být v mnoha variantách. Mohou být umístěny v drážkách, pod různými úhly, nebo jen přímo na povrchu. Vzhledem ke značným odstředivým silám při maximálních otáčkách rotoru jsou permanentní magnety ještě bandážovány tzv. Res-i-glasem, který je o síle několika desetin mm. Jde o prameny skelných vláken, kterými jsou magnety staženy. Skelná vlákna se na rotoru dále impregnují epoxidovou nebo polyuretanovou pryskyřicí, čímž po vytvrzení vznikne kompozitní materiál s výbornými mechanickými parametry. Magnetická indukce permanentních magnetů bývá okolo 1 T a ve většině případů bývají tyto ze slitiny Sm-Co nebo Nd-Fe-B.

3.3. Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou vyráběny ze speciálních slitin obsahujících vzácné zeminy, nikl, kobalt, stroncium, bárium atd. Vznikají tak různé typy magnetů, avšak nejvíce rozšířeným typem pro použití v synchronních strojích jsou magnety typu NdBFe. Tyto magnety mají vysokou hodnotu magnetické indukce. Rozhodující kritérium pro použití konkrétního typu je také pracovní teplota, která závisí na Curieově teplotě konkrétní slitiny. Překročí-li se Curieova teplota, dojde ke ztrátě feromagnetických vlastností. Vybrané parametry používaných magnetů jsou v následující tabulce č. 1:

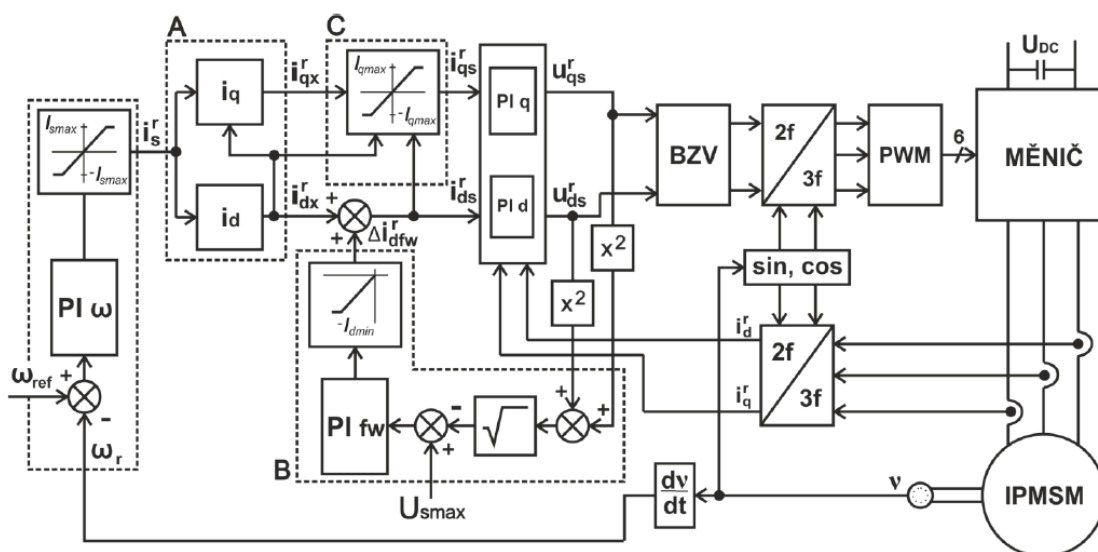
Materiál	Remanence	Koercitivní síla	Energetický součin	Pracovní teplota
	B_r [T]	H_k [kA/m]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	t_{prac} [°C]
Anizotropní ferit	0,395	190,99	27,06	400
Sintrované Al-Ni-Co	1,090	49,34	31,04	540
Lité Al-Ni-Co	0,820	131,31	42,19	540
Sm-Co 20 (1,5)	0,900	636,64	159,20	260
Sm-Co 28 (2,17)	1,050	756,01	222,88	350
Nd-Fe-B (N45)	1,350	859,46	358,20	80
Nd-Fe-B (33UH)	1,150	851,50	262,68	180

Tabulka č. 1: Základní vlastnosti permanentních magnetů



4. Vektorové řízení

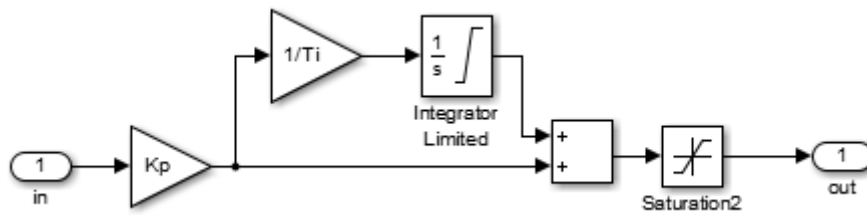
PMSM motory fungují špatně s otevřenou smyčkou skalárního řízení U/f, protože neexistuje žádné rotorové vinutí, které by tlumilo přechodové jevy. Proto se pro řízení PMSM výhradně používá vektorové řízení. V anglicky psané literatuře se vektorové řízení nazývá Field-oriented Control (FOC) nebo jen Vector Control (VC). Při vektorovém řízení PMSM je snaha přiblížit se řízení stejnosměrného, cize buzeného motoru, kde je magnetické pole statoru a rotoru vzájemně kolmé (díky komutátoru). Je tedy třeba rozložit prostorový vektor statorových proudů motoru na dvě vzájemně kolmé složky i_d a i_q [A]. Proud v ose d je tokotvorný, protože ovlivňuje sprážený magnetický tok motoru ψ . Tento tok je za normálních provozních podmínek, kdy PMSM neodbuzujeme (kvůli tzv. nadsynchronním otáčkám), zajištěn permanentními magnety. Proto tedy proud v ose d regulujeme na nulovou hodnotu. Proud v ose q je momentotvorný. Představuje proud kotvy u cize buzeného DC stroje. U PMSM je moment stroje přímo úměrný proudu i_q . Momentotvorná složka proudu se reguluje odděleně, na základě požadavků otáčkového regulátoru, který porovnává žádané a skutečné otáčky. Kromě otáček je nutné znát i úhel natočení rotoru pro transformace systémů. Blokové schéma vektorového řízení je na následujícím obrázku č. 1.



Obrázek č. 1: Schéma vektorového řízení

4.1. Regulace

Součástí vektorového řízení je regulace proudů a regulace otáček. Regulace jsou zapojeny ve standardní uzavřené smyčce. Cílem regulace je na výstupu y získat stejnou hodnotu, jako je hodnota požadované veličiny w . Regulační odchylka (chyba) e je rozdíl mezi žádanou veličinou w a skutečnou veličinou y . Regulační odchylka e vstupuje do samotného regulátoru, který má určitý přenos $G_R(s)$. Regulátory jsem použil typu PI, akční veličina u , která je výstupem regulátoru se snaží uvést soustavu do požadovaného stavu. Tato veličina je omezoována minimem a maximem (mez saturace). Pokud by se tato hodnota neomezovala, mohlo by dojít, při skokové změně požadované veličiny, k přetížení měniče nebo vinutí PMSM. Subsystem regulátoru je na následujícím obrázku č. 2.



Obrázek č. 2: Celkový model PMSM (MATLAB/SIMULINK)

5. Transformace souřadnicových systémů

Vektorové řízení pracuje v d, q systému. Tento systém je výhodný proto, že jsou na sebe složky kolmé, díky čemuž je vzájemná indukčnost mezi vinutími nulová. Také statorový proud a napětí se otáčí synchronně s d, q systémem, a jeví se tak tyto veličiny jako stejnosměrné, čehož se využívá právě u vektorového řízení. Nejdříve je nutné převést systém a, b, c , který je spřažen se státorem, do systému α, β pomocí tzv. Clarkové transformace. Systém α, β je také spřažen se státorem. Teprve v dalším kroku provedeme transformaci systému α, β do systému d, q , který je již spřažen s magnetickým polem, vůči statoru se tedy otáčí synchronními otáčkami. Tato transformace se nazývá Parkova.

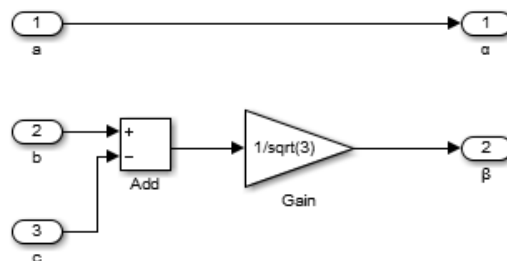
5.1. Clarkové transformace

Rovnice pro proudy:

$$i_{\alpha} = i_a \quad (1)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (2)$$

V programu MATLAB/SIMULINK Clarkové transformace vypadá dle následujícího obrázku č. 3.



Obrázek č. 3: Clarkové transformace (MATLAB/SIMULINK)



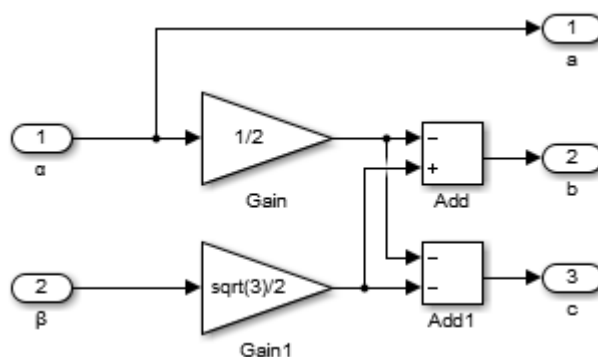
Pro zpětnou transformaci Clarkové platí:

$$i_a = i_\alpha \quad (3)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \quad (4)$$

$$i_c = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \quad (5)$$

V programu MATLAB/SIMULINK zpětná Clarkové transformace vypadá dle následujícího obrázku č. 4.



Obrázek č. 4: Zpětná transformace Clarkové (MATLAB/SIMULINK)

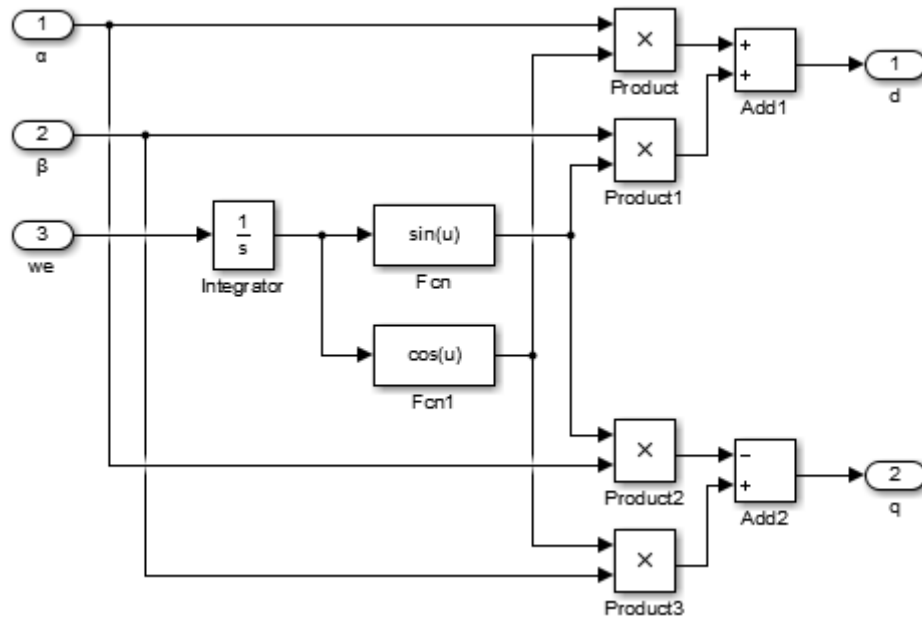
5.2. Parkova transformace

Rovnice pro proudy:

$$i_d = i_\alpha \cos\varphi + i_\beta \sin\varphi \quad (6)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin\varphi + i_\beta \cos\varphi \quad (7)$$

V programu MATLAB/SIMULINK Parkova transformace vypadá dle následujícího obrázku č. 5.



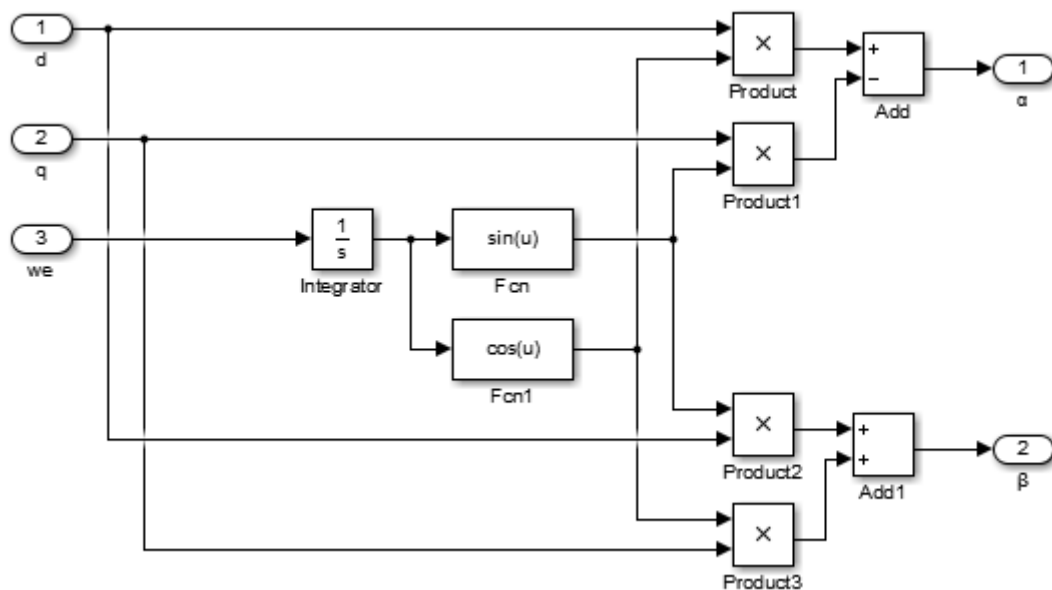
Obrázek č. 5: Parkova transformace (MATLAB/SIMULINK)

Pro zpětnou Parkovu transformaci platí:

$$i_{\alpha} = i_d \cos\varphi - i_q \sin\varphi \quad (8)$$

$$i_{\beta} = i_d \sin\varphi + i_q \cos\varphi \quad (9)$$

V programu MATLAB/SIMULINK zpětná Parkova transformace vypadá dle následujícího obrázku č. 6.



Obrázek č. 6: Zpětná Parkova transformace (MATLAB/SIMULINK)



6. Matematický model elektrického točivého stroje

PMSM je popsán matematickými rovnicemi, na základě kterých je sestaven model v programu MATLAB – SIMULINK. Rovnice, kterými je stroj popsán, respektují jeho mechanické a elektrické vlastnosti, avšak rovnice jsou do jisté míry zjednodušeny. Oproti reálnému stroji jsou tak jeho modelované vlastnosti za určitých podmínek mírně odlišné. Pokud však máme veškerá zjednodušení na paměti, lze tyto odchylky s úspěchem zanedbat.

Následující zjednodušení a předpoklady:

- 1) Motor je napájen souměrným, harmonickým napětím.
- 2) Činný odpor a indukčnost jednotlivých fázových vinutí jsou shodné, nemění se s teplotou, ani s frekvencí.
- 3) Vinutí jsou rozložena symetricky v magnetickém obvodu.
- 4) Neexistují mezizávitové kapacitní vazby ve vinutí.
- 5) Neexistují kapacitní vazby mezi jednotlivými vinutími, ani mezi vinutími a kostrou.
- 6) Ztráty v železe jsou zanedbatelné.
- 7) Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře je harmonické (neuvažuje se vliv drážkování statorového paketu na rozložení intenzity magnetického pole).
- 8) Vzhledem k tomu, že buzení je řešeno permanentními magnety, nepředpokládá se přítomnost tlumícího ani rozběhového vinutí (za standardních provozních podmínek je rotor vždy v synchronismu s točivým magnetickým polem statoru), a ani nejsou uvažovány tlumící účinky rotoru.
- 9) Parametry motoru jsou časově i teplotně nezávislé.

6.1. Parametry motoru

V následující tabulce č. 2 jsou uvedeny parametry simulovaného PMSM, na kterém je ověřena správná funkce celého modelu elektromobilu, a který byl vybrán tak, aby vyhovoval požadavkům modelovaného elektromobilu.



PMSM			
Jmenovitý výkon	P	[kW]	50
Trvalý moment (teplota vinutí 100 °C)	$M_{100\text{ °C}}$	[Nm]	80
Maximální moment	M_{\max}	[Nm]	400
Počet pólpárů	2p	[-]	4
Moment setrvačnosti rotoru	J_{rot}	[kg*m ²]	0.0386
Elektrický odpor (teplota vinutí 100 °C)	$R_{100\text{ °C}}$	[Ω]	0.05
Indukčnost v ose d	L_d	[mH]	1.92
Indukčnost v ose q	L_q	[mH]	5
Magnetický tok magnetů	ψ_m	[Wb]	0.8
Materiál PM	[-]	[-]	NdFeB
Vzduchová mezera	l	[mm]	0.73
Trvalý proud (teplota vinutí 100 °C)	$I_{100\text{ °C}}$	[A]	45
Maximální doporučené otáčky	n_{\max}	[ot*min ⁻¹]	6000
Jmenovité napětí	U_n	[V]	400

Tabulka č. 2: Parametry simulovaného stroje PMSM

6.2. Modelování

V programu MATLAB – SIMULINK se vytvoří model PMSM na základě napěťových rovnic a spřažených magnetických toků v d, q systému, a také na základě pohybové rovnice. Vstupními proměnnými bude střídavé napájecí napětí a požadovaný zátěžný moment. Výstupem pak budou proudy a otáčky rotoru [8].

6.2.1. Rovnice pro napětí v d, q systému

Pro napětí na statorovém vinutí v d, q systému platí:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (10)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (11)$$

kde u_d a u_q [V] jsou transformovaná vstupní napětí na statoru, i_d a i_q [A] jsou statorové proudy v souřadném systému, d, q , ψ_d a ψ_q [Wb] jsou spřažené magnetické toky v d, q systému, ω_e [rad/s] je elektrická úhlová rychlost a R_s [Ω] je činný odpor statorového vinutí.

6.2.2. Spřažené magnetické toky v d, q systému

Pro spřažené magnetické toky v d, q systému platí:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (12)$$



$$\psi_q = L_q i_q \quad (13)$$

kde L_d a L_q [H] jsou příčná a podélná indukčnost, ψ_m [Wb] představuje spřažený magnetický tok permanentních magnetů na rotoru.

Permanentní magnety jsou v ose d , k ose q jsou kolmo, proto se neuplatňuje spřažený magnetický tok permanentních magnetů v rovnici č. 13.

6.2.3. Vztah elektrické a mechanické úhlové rychlosti

Pro elektrickou úhlovou rychlost platí:

$$\omega_e = p_p \omega_m \quad (14)$$

kde p_p [-] je počet pólů a ω_m [rad/s] je mechanická úhlová rychlost.

6.2.4. Pohybová rovnice v d, q systému

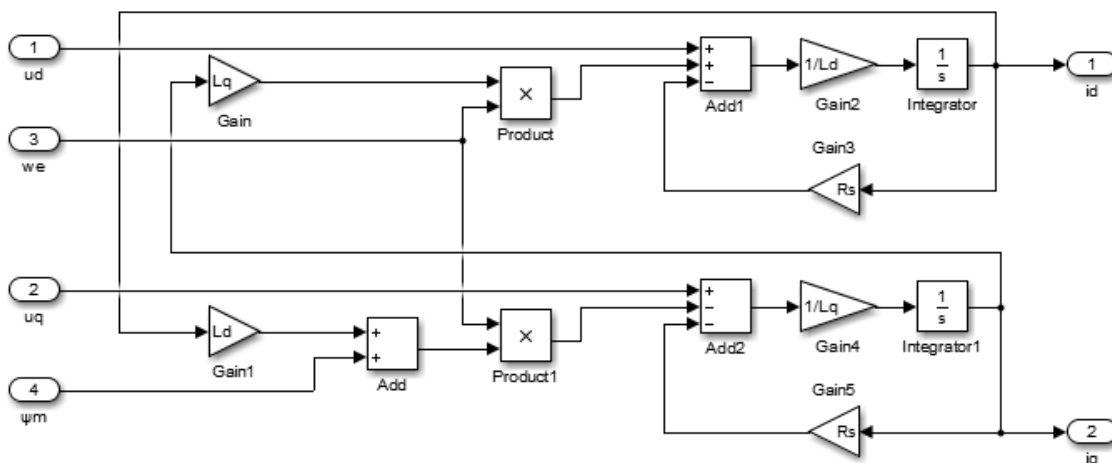
Pro moment motoru lze psát:

$$m_i = p_p \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = J \frac{d\omega_m}{dt} + m_z \quad (15)$$

kde J [kg*m²] je moment setrvačnosti rotoru a m_z [Nm] je zátěžný moment.

6.2.5. Výpočet proudů PMSM

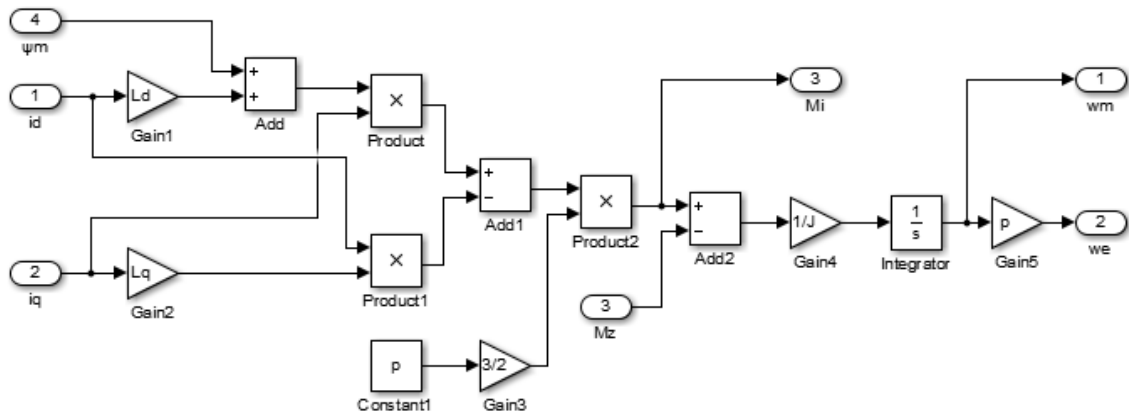
Proudy PMSM se vypočítávají v subsystému Motor – proud, který je zobrazen na následujícím obrázku č. 7, výpočet se provádí na základě napěťových rovnic (10) a (11).



Obrázek č. 7: Výpočet proudů (MATLAB/SIMULINK)

6.2.6. Výpočet momentu a otáček PMSM

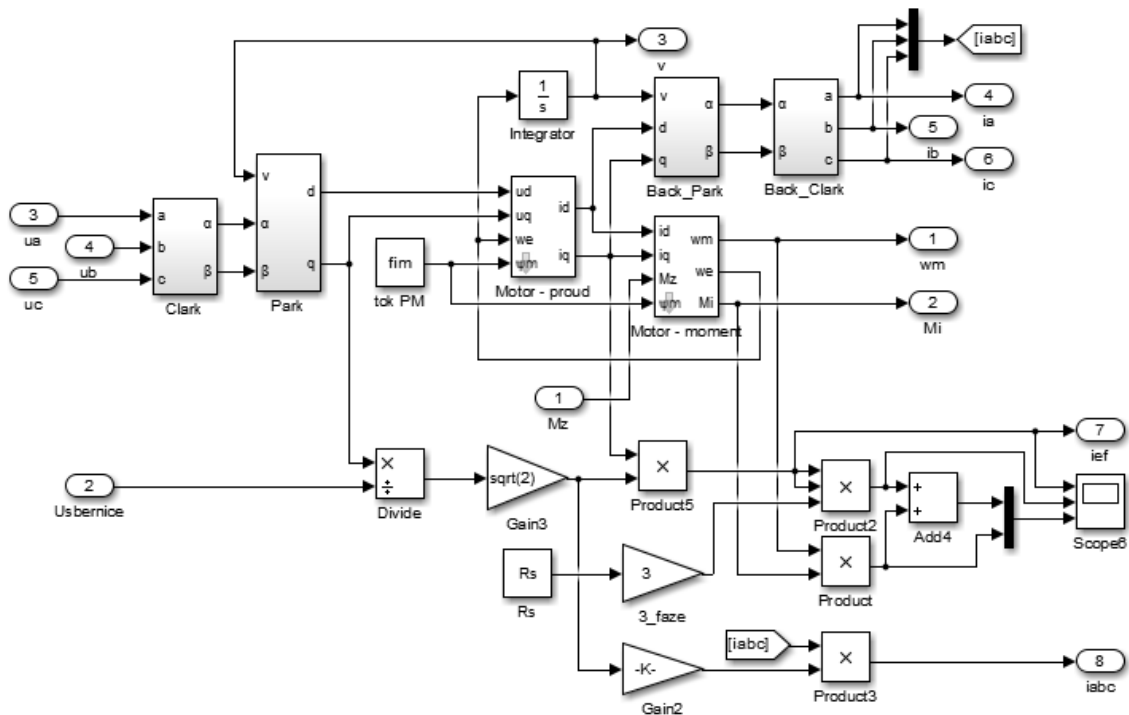
Pro výpočet zátěžného momentu PMSM je využita pohybová rovnice č. 16, pro výpočet mechanické a elektrické úhlové rychlosti je využita rovnice (15). Výpočet se provádí v subsystému Motor – moment, který je na následujícím obrázku č. 8.



Obrázek č. 8: Výpočet momentu a otáček (MATLAB/SIMULINK)

6.2.7. Celkový model PMSM

Celkový model PMSM je v subsystému PMSM, který je zobrazen na následujícím obrázku. V tomto subsystému se vstupní napájecí napětí transformuje do d, q systému, kde se spočítají proudy, vnitřní moment PMSM a otáčky. Proudů jsou zpět transformovány do systému a, b, c . V tomto subsystému se též porovnává příkon s výkonem PMSM a je možné určovat jeho účinnost v průběhu jeho provozu. Viz obrázek č. 9.



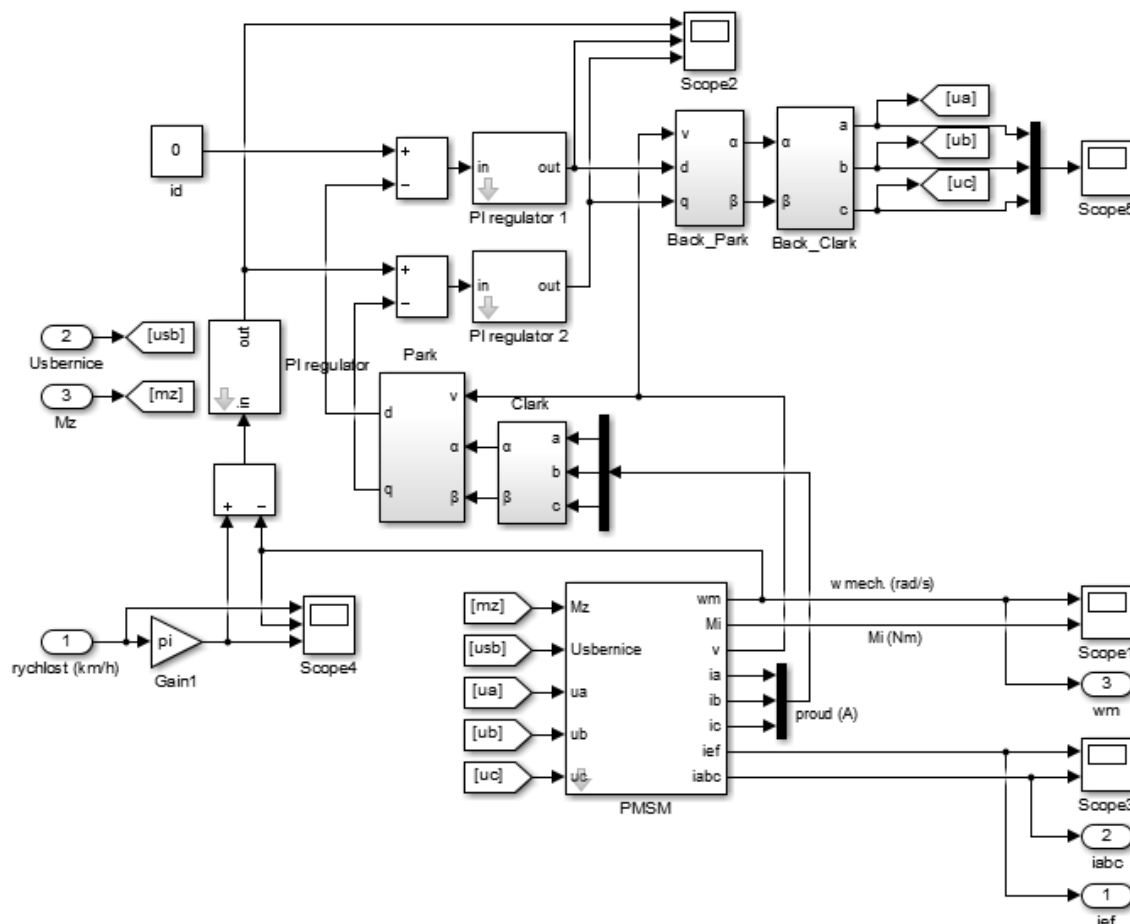
Obrázek č. 9: Celkový model PMSM (MATLAB/SIMULINK)

6.2.8. Model vektorového řízení

V subsystému „PMSM + Vektor. řízení“ je PMSM, který je vektorově řízen. Proudů tekoucí do PMSM se převedou ze systému a, b, c do souřadného systému d, q . Transformované proudy se přivádí do regulačních smyček. V tokotvorné smyčce se proud reguluje na nulovou hodnotu. V momentotvorné smyčce se proud reguluje dle požadavků otáčkové regulační smyčky.



Otáčková regulační smyčka reguluje otáčky dle požadavku. Požadované otáčky se přepočítávají dle požadované rychlosti vozidla. Tyto simulace neobsahují model střídače. Model střídače jsem vytvořil z bloků SIMSCAPE (viz obrázek č. 10), nicméně se čas potřebný k celé simulaci o řád zvětšil.



Obrázek č. 10: Model vektorového řízení

7. Mechanický model elektromobilu

Pro určování zátěžného momentu PMSM je nutné sestavit mechanický model elektromobilu, který bude v maximální míře respektovat reálné vlastnosti pohybu vozidla na vozovce. Při pohybu vozidla musí být respektován valivý odpor, odpor vzduchu a odpor stoupání.

7.1. Valivý odpor

Valivý odpor představuje sílu působící proti směru pohybu vozidla, která vzniká deformací pneumatiky při styku s vozovkou. Platí pro ni vztah:

$$O_{val} = f_k \cdot G \cdot \cos(\alpha) \quad (16)$$



kde f_k [-] je součinitel valivého odporu, G [N] je tíha vozidla ($G = m_v \cdot g$), m_v [kg] je celková hmotnost vozidla, g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] je gravitační zrychlení a α [°] je sklon vozovky (stoupání/klesání).

Úhel α [°] se během celého jízdního cyklu (daného rychlostním profilem) může měnit na základě výškového profilu, který udává sklon vozovky závislý na čase, respektive místu, kde se vozidlo zrovna nachází.

Součinitel valivého odporu je závislý na rychlosti, ale pokud není překročena tzv. kritická rychlost, lze jej považovat za konstantní. Kritická rychlost nastává u osobních aut až cca při 120 km/h. Součinitel valivého odporu je především závislý na povrchu vozovky. Příklad hodnot součinitele valivého odporu pro různé povrchy vozovky je na následující tabulce č. 3:

Vozidlo	f_k
[-]	[-]
Asfalt	0.01 - 0.02
Beton	0.015 - 0.025
Dlažba	0.02 - 0.03
Čerstvý sníh	0.2 - 0.3
Náledí	0.01 - 0.025
Suchá polní cesta	0.04 - 0.05
Mokrý polní cesta	0.08 - 0.2
Písek	0.15 - 0.3

Tabulka č. 3: Závislost součinitele valivého odporu na typu vozovky

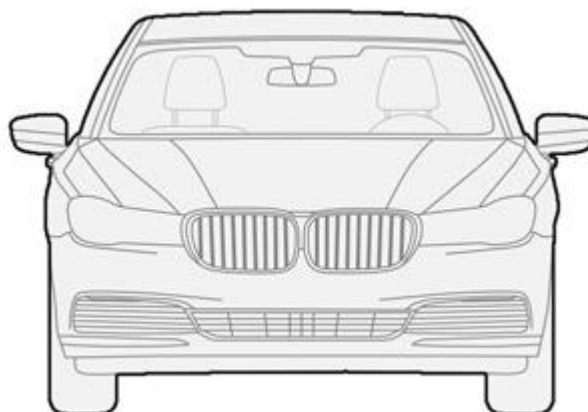
7.2. Odpor vzduchu

Odpor vzduchu představuje sílu působící proti směru pohybu vozidla, která vzniká třením vozidla o vzduch. Platí pro ni vztah:

$$O_{vzd} = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v^2 \quad (17)$$

kde c_x [-] je součinitel odporu vzduchu, ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je měrná hmotnost vzduchu, S_x [m^2] je čelní plocha vozidla a v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost vozidla.

Čelní plocha vozidla je plocha ohraničená celkovým obrysem vozidla při čelním pohledu na vozidlo. Je určována např. projekční metodou. Před vozidlo se umístí vhodný světelný zdroj a na stínítko umístěné za vozidlem se promítne čelní plocha vozidla, kterou je pak třeba vyčíslit v m^2 . Druhou možností je metoda laserového paprsku. Laser umístěný před vozidlem se může pohybovat vertikálně a horizontálně, jeho pohyb kopíruje čelní obrys vozidla a čelní plocha vozidla je zobrazena na fotocitlivém stínítku umístěném za vozidlem. Příklad obrysu čelní plochy vozidla je na následujícím obrázku č. 11:



Obrázek č. 11: Obrys čelní plochy vozidla

Součinitel odporu vzduchu je bezrozměrná veličina, která reprezentuje aerodynamickou „čistotu“ vozidla. Obvyklé hodnoty jsou od 0,2–0,4. Automobilky se snaží tuto hodnotu maximálně snížit vzhledem ke spotřebě vozidla. Velikost této hodnoty je zásadní u sportovních aut. Příklady hodnot pro různá vozidla je v následující tabulce č. 4.

Vozidlo	Rok výroby	c_x
[-]	[-]	[-]
Honda civic	2001	0.36
Mini cooper	2008	0.35
Audi A3	2006	0.33
Škoda octavia	2000	0.31
Mazda 3	2010	0.28
Citroen C4	2004	0.28
Mazda 6	2009	0.27

Tabulka č. 4: Příklady hodnot součinitelů odporu vzduchu pro různá vozidla

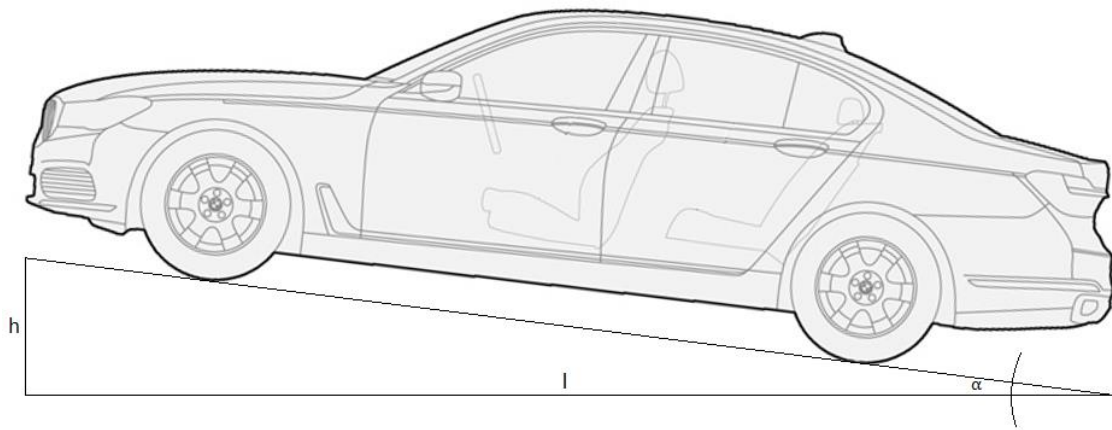
7.3. Odpor stoupání

Odpor stoupání představuje sílu působící proti směru pohybu vozidla, která vzniká pohybem vozidla po nakloněné rovině. Platí pro ni vztah:

$$O_s = G \cdot \frac{h}{l} = G \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (18)$$

kde G [N] je tíha vozidla ($G = m_v \cdot g$), m_v [kg] je celková hmotnost vozidla, g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] je gravitační zrychlení, h [m] je výška nakloněné roviny, l [m] je délka nakloněné roviny a α [°] je sklon vozovky (stoupání/klesání).

Určení úhlu stoupání je na obrázku č. 12.



Obrázek č. 12: Určení úhlu stoupání

7.4. Odpor zrychlení

Odpor zrychlení představuje setrvačné silové účinky vozidla. Skládá se ze dvou složek. Jednou složkou je posuvná část odporu zrychlení O_{zp} , která je závislá na celkové hmotnosti vozidla a zrychlení vozidla. Druhou složkou odporu zrychlení je rotační část O_{zr} , která je závislá na poloměru pneumatik, zrychlení vozidla a momentu setrvačnosti rotačních částí vozidla. Rotačními částmi jsou myšleny pneumatiky, poloosy apod. Výsledný vztah pro odpor zrychlení je následující:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} = (m_v \cdot a_x) + \left(\frac{J_v}{r_k^2} \cdot a_x \right) = \left(1 + \frac{J_v}{m_v \cdot r_k^2} \right) \cdot m_v \cdot a_x \quad (19)$$

kde O_{zp} [N] je posuvná část odporu zrychlení působící ve směru vozidla, O_{zr} [N] je rotační část odporu zrychlení, m_v [kg] je celková hmotnost vozidla, a_x [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] je zrychlení vozidla, J_v [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] je moment setrvačnosti rotačních částí vozidla a r_k [m] je poloměr pneumatik vozidla.

Moment setrvačnosti rotačních hmot je závislý na hmotnosti vozidla, hmotnosti rotačních částí a poloměru pneumatik. Rovnici pro odpor zrychlení lze pak upravit do následujícího tvaru:

$$O_z = \left(1 + \frac{J_v}{m_v \cdot r_k^2} \right) \cdot m_v \cdot a_x = \left(\frac{m_v + m_r}{m_v} \right) \cdot m_v \cdot a_x \quad (20) \\ = (m_v + m_r) \cdot a_x$$

7.5. Výpočet momentu PMSM

Nejdříve je potřeba určit závislost mezi podélným zrychlením vozidla a zrychlením otáček PMSM. Platí následující vztah:

$$a_x = \dot{v} = \frac{d\omega_m}{dt} \cdot \frac{r_k}{N} \quad (21)$$

kde ω_m [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] je úhlová rychlost PMSM, r_k [m] je poloměr pneumatik vozidla a N [-] je převodový poměr převodovky.

Valivý odpor, odpor vzduchu a odpor stoupání si vyjádříme jednou výslednou silou pomocí rovnice:



$$F_{od} = O_{val} + O_{vzd} + O_{vzd} \quad (22)$$

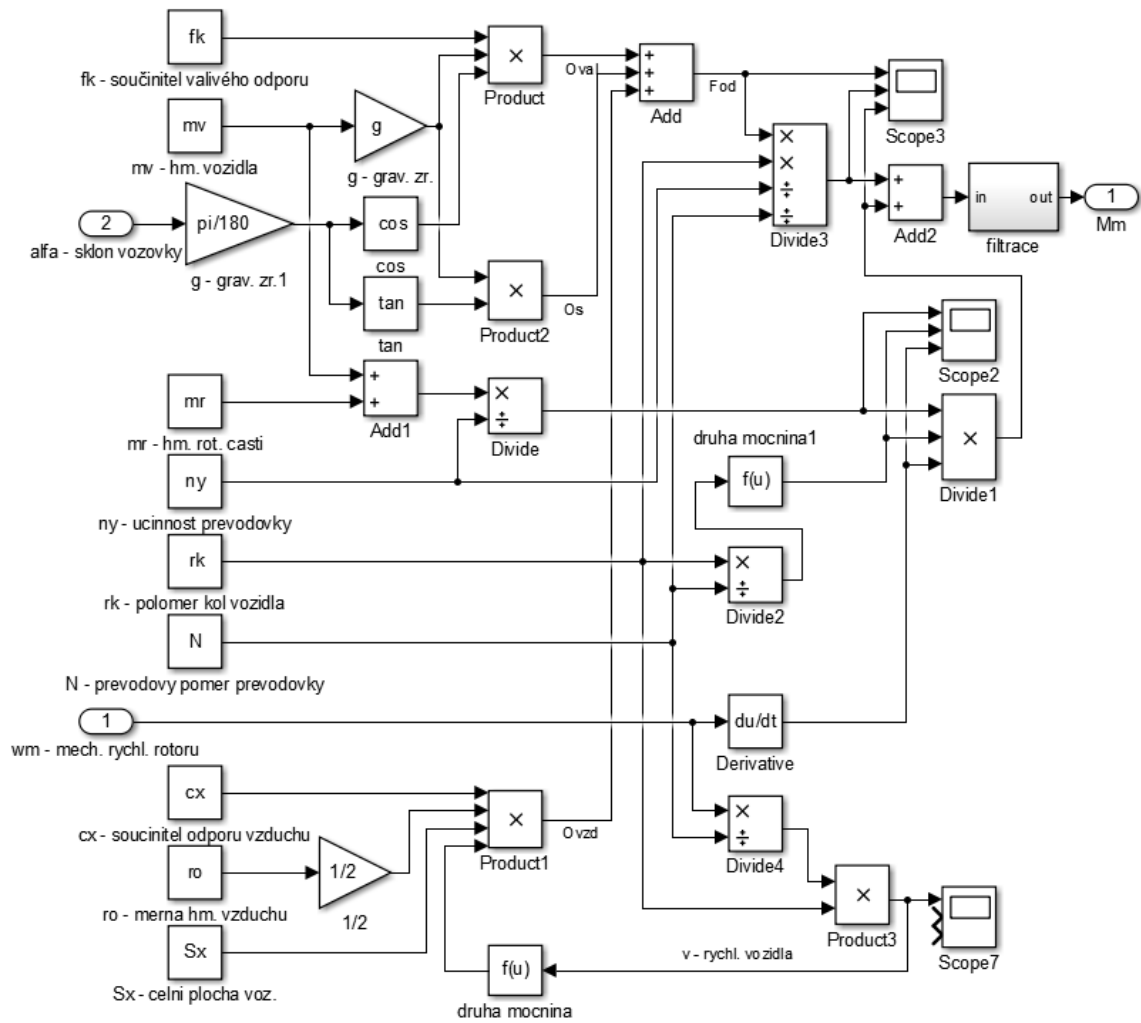
Rovnice pro výsledný zátěžný moment PMSM vychází z obecného tvaru rovnice pro výpočet momentu z působící síly na rameni. Moment je ještě přepočítán přes převodový poměr a ve výpočtu je zahrnuta i účinnost převodovky. Rovnice pak bude v následujícím tvaru:

$$M_m = [(m_v + m_r) \cdot a_x + F_{od}] \cdot \frac{r_k}{N \cdot \eta} \quad (23)$$

Dosažením rovnice (21) do rovnice (23) vznikne výsledný tvar rovnice pro zátěžný moment PMSM:

$$\begin{aligned} M_m &= \left[(m_v + m_r) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \cdot \frac{r_k}{N} + F_{od} \right] \cdot \frac{r_k}{N \cdot \eta} \\ &= \frac{(m_v + m_r)}{\eta} \cdot \left(\frac{r_k}{N} \right)^2 \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + F_{od} \cdot \frac{r_k}{N \cdot \eta} \end{aligned} \quad (24)$$

Mechanický model elektromobilu je pak popsán předešlými rovnicemi. Vstupními proměnnými jsou skutečná úhlová rychlost rotoru PMSM ω_m [rad.s⁻¹] a sklon vozovky α [°]. Úhlová rychlost rotoru PMSM ω_m [rad.s⁻¹] je přímo závislá na rychlosti elektromobilu v [km.h⁻¹], tedy za předpokladu, že nedochází k protáčení pneumatik na vozovce. Ostatní veličiny jsou zadány jako konstanty. Mechanický model vytvořený v MATLAB/SIMULINK je na následujícím obrázku č. 13:



Obrázek č. 13: Mechanický model vozidla v MATLAB/SIMULINK

V následující tabulce č. 5 jsou uvedeny mechanické parametry simulovaného elektromobilu:

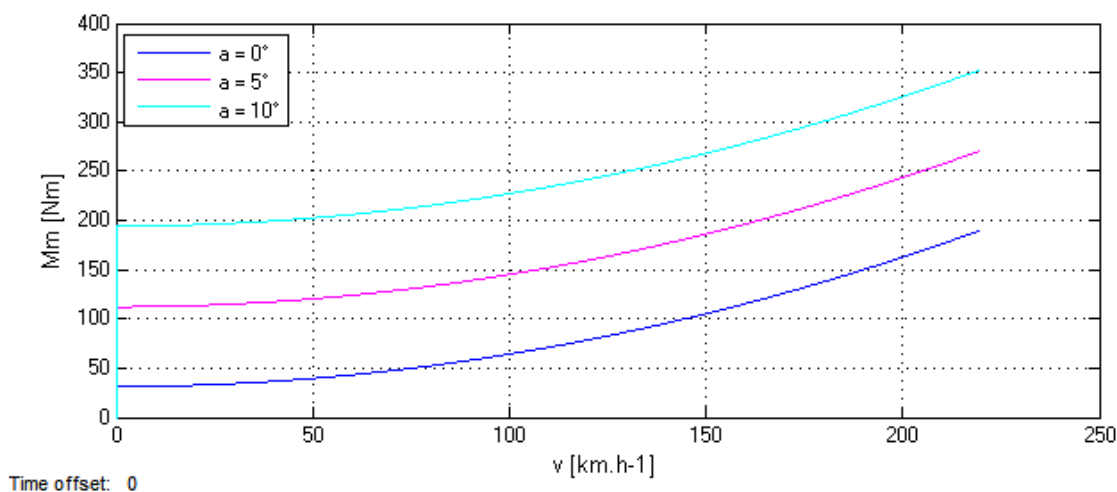
Parametry simulovaného vozidla			
Celková hmotnost vozidla	m_v	[kg]	1000
Hmotnost rotačních částí	m_r	[kg]	72
Poloměr pneumatik	r_k	[m]	0.317
Čelní plocha vozidla	S_x	[m ²]	1.8
Převodový poměr	N	[-]	3.58
Účinnost převodovky	η	[-]	0.94
Součinitel valivého odporu	f_k	[-]	0.0035
Součinitel odporu vzduchu	c_x	[-]	0.4
Měrná hmotnost vzduchu	ρ	[kg.m ³]	1.25
Gravitační zrychlení	g	[m.s ²]	9.81

Tabulka č. 5: Mechanické parametry simulovaného elektromobilu



Pro simulaci byly uvažovány pneumatiky 195/65 R15 (průměr = 634 mm) a planetová převodovka s převodem 1 : 3,58. Z těchto parametrů vychází, že při maximálních otáčkách PMSM (6000 ot.min⁻¹) je rychlost elektromobilu 200 km.h⁻¹. Ukázka simulace je na následujícím obrázku, kde je zobrazena závislost zátěžného momentu M_m [Nm] na rychlosti vozidla v [km.h⁻¹] a na sklonu vozovky α [°].

Příklad zátěžných momentů (působících na PMSM) v závislosti na rychlosti a na sklonu vozovky je na obrázku č. 14.



Obrázek č. 14: Zátěžný moment v závislosti na rychlosti a na sklonu vozidla

8. Elektrochemický zdroj

Pro elektromobily jsou v současné době hojně využívané akumulátorové baterie na bázi lithia, a to z důvodu nízké hmotnosti, velké objemové kapacity a životnosti. Lithium-iontové články jsou sekundárními články, tedy akumulátory. Kladná elektroda obsahuje ionty lithia a záporná je z porézního uhlíku. Ionty lithia jsou v kladné elektrodě hluboce zakořeněné pomocí interkalace. Výsledným materiálem pro kladné elektrody bývají oxidy typu $\text{Li}_1 + x \text{CoO}_2$ a $\text{Li}_1 + x \text{NiO}_2$.

Mezi elektrodami Li-ion akumulátorů je elektrolyt a separátor (oddělovací membrána). Elektrolyty bývají kapalné, gelové nebo keramické. V současné době jsou nejrozšířenějšími elektrolyty pro Li-ion akumulátory soli LiPF_6 rozpuštěné v karbonovém rozpouštědle. Separátor slouží jako izolant mezi kladnou a zápornou elektrodou. Separátor by měl být chemicky odolný, velmi malé síly (10 μm - 30 μm) a měl by mít velkou smáčivost povrchu pro elektrolyt. Používá se velmi často tkaný nebo plstěný nylon.

Li-ion články se dále rozlišují dle použitého materiálu kladné elektrody. Vznikají tak články označovány jako: LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiMnCoO_2 , LiNiCoAlO_2 a další. Vždy tedy jde o použití lithných iontů pro kladný aktivní materiál. Jako záporný aktivní materiál bývá použit



uhlík. Při nabíjení kladný aktivní materiál oxiduje a záporný redukuje. Li-Pol články jsou v podstatě upravené články Li-ion. Kapalný elektrolyt je nahrazen pevným, který zároveň plní funkci separátoru. Elektrodový systém může být totožný.

Z hlediska bezpečnosti, měrné energie a životnosti se velmi často používají pro pohon elektromobilu akumulátory typu LiFePO_4 .

8.1. LiFePO_4 – Lithium železo fosfátový akumulátor

Označuje se též jako LFP akumulátor. Výhody spojené s použitím tohoto materiálu pro kladnou elektrodu Li-ion článků jsou: dostupnost železa, netoxičita, vysoká tepelná odolnost (destrukce až nad $800\text{ }^\circ\text{C}$ – tepelně odolá přímému zkratu) a bezpečnostní vlastnosti. Alternativou LiFePO_4 článků jsou články typu LiFeYPO_4 . Jejich rozdílem je, že mají kladnou elektrodu dopovanou yttriem, čímž je docíleno větší stability elektrody. Dalšími vlastnostmi těchto článků jsou: velmi plochá vybíjecí křivka (téměř konstantní napětí), vysoký počet dobíjecích cyklů, nemají paměťový efekt, vysoká životnost (více než 10 let), vysoká dobíjecí účinnost (cca 95 %), nominální napětí 3,3 V, energie/hmotnost: 110 Wh/kg, energie/velikost: 220 Wh/L, specifická kapacita: 170 mAh/g.

8.2. BMS (Battery management system)

Pro trakci je obvykle zapotřebí větší napětí, než je napětí jednoho článku, proto jsou jednotlivé články spojovány do série. Články nejsou nikdy zcela shodné – mají v řádech desetin promile rozdílné kapacity, jmenovitá napětí a vnitřní odpor. Také se může stát, že články nejsou stejně vybity vlivem např. rozdílného samovybití. V případě, že by při nabíjení nebyl použit aku balancer, hrozilo by, že na člancích s menším vnitřním odporem by bylo menší napětí, a naopak u článků s větším vnitřním odporem by bylo napětí vyšší, které by mohlo překročit maximální nabíjecí napětí. To by vedlo ke znatelnému snížení životnosti článku.

Základem BMS (Battery management system) je tzv. Aku balancer, který měří napětí na každém článku baterie, a také proud protékající každým článkem, případně i teplotu. Pokud je na některém článku jiné napětí, než na ostatních člancích, je toto napětí upraveno tak, aby se všechny články akumulátoru nabíjely i vybíjely rovnoměrně. Navíc pomocí tohoto systému lze diagnostikovat každý článek akumulátoru, a lze pak snadno predikovat životnost konkrétních článků a celkový dojezd elektromobilu.

Nabíjení LiFePO_4 akumulátorů je v zásadě rozděleno na tři kroky. V prvním kroku je akumulátor nabíjen konstantním proudem. Hodnota tohoto proudu musí být vhodně zvolena tak, aby byl akumulátor nabíjen co nejrychleji, ale zároveň nebyla překročena maximální hodnota nabíjecího proudu. Na té závisí životnost akumulátoru a bezpečnost. Konstantní proud je regulován pomocí aku balanceru. Napětí na jednotlivých člancích v tomto kroku postupně roste. Při dosažení maximálního nabíjecího napětí na článku je zvolen krok č. 2. V tomto kroku již napětí neroste a postupně se snižuje proud v důsledku snižujícího se rozdílu napětí zdroje a vnitřního napětí článku. Když proud klesne na cca $1/24$ maximálního nabíjecího proudu je ukončen krok č. 2. Ve 3. kroku je na jednotlivých člancích nastaveno relaxační napětí a jsou považovány za plně nabity.



8.3. Model akumulátoru

Model akumulátoru respektuje vlastnosti reálného akumulátoru. V modelu je zahrnuta ztráta kapacity vlivem opotřebení, způsobeného počtem vybíjecích cyklů a skladováním za určité teploty a času. Většina rovnic popisujících vlastnosti akumulátorů jsou empirické, avšak vstupní proměnné jsou libovolné dle technické specifikace (datasheet) modelovaného akumulátoru. Rovnice jsou čerpány z práce [19].

8.3.1. Výstupní napětí akumulátoru

Výstupní napětí akumulátoru je dáno napětím naprázdno, od kterého se odečte úbytek napětí na impedanci akumulátoru a přičte teplotní koeficient potenciálu akumulátoru. Platí následující vztah:

$$U_{bat} = U_{OC} - i_{bat} \cdot Z_{eq} + \Delta E(T) \quad (25)$$

kde U_{OC} [V] je napětí naprázdno, i_{bat} [A] je proud protékající akumulátorem, Z_{eq} [Ω] je impedance akumulátoru a $\Delta E(T)$ [V] je teplotní koeficient potenciálu akumulátoru.

8.3.2. Napětí naprázdno akumulátoru

Jde o napětí na svorkách ideálního akumulátoru, přes který neteče žádný proud. Je silně závislé na stavu nabití, který se označuje jako tzv. State of Charge (SOC), dále jen SOC. Pro napětí naprázdno akumulátoru platí:

$$U_{OC}(SOC) = -1,031 \cdot \exp(-35 \cdot SOC) + 3,685 + 0,2156 \cdot SOC - 0,1178 \cdot SOC^2 + 0,321 \cdot SOC^3 \quad (26)$$

kde SOC [-] je stav nabití akumulátoru.

Pro SOC lze psát následující vztah:

$$SOC = SOC_{init} - \int (i_{bat} / C_{usable}) dt \quad (27)$$

kde SOC_{init} [-] je počáteční stav nabití akumulátoru, i_{bat} [A] je proud protékající akumulátorem a C_{usable} [Ah] je kapacita akumulátoru.

8.3.3. Vliv úbytku kapacity během životnosti

Snižování kapacity během životnosti je přirozená vlastnost elektrochemických zdrojů. Akumulátor lze obecně považovat za použitelný do 80 % jeho původní kapacity. Modelování tohoto postupného ubývání kapacity je vhodné zejména z důvodu určování zbývající životnosti, a lze tak celý model elektromobilu optimalizovat z hlediska životnosti, protože obecně lze říci, že akumulátor elektromobilu je nejslabším článkem celého elektromobilu. Je tedy nutné věnovat pozornost právě akumulátoru při jeho návrhu pro použití v elektromobilu.

Pokles úbytku kapacity akumulátoru je zapříčiněn dvěma faktory. Prvním jsou kalendářní ztráty (Calendar life losses) a druhým pak ztráty vlivem vybíjecích cyklů (Cycle life losses).



Na oba faktory má zásadní vliv teplota. Pro stanovení zbývající kapacity akumulátoru si zavedeme korekční faktor CCF, pro který platí:

$$CCF = 1 - (Calendar_life_losses + Cycle_life_losses) \quad (28)$$

Pak zbývající kapacita akumulátoru bude definována takto:

$$C_{usable} = C_{initial} \cdot CCF \quad (29)$$

Pro kalendářní ztráty platí následující empirický vztah:

$$Calendar_life_losses = 1,544 \cdot 10^5 \cdot \exp\left(\frac{40498}{8.3143 \cdot T}\right) \cdot t \quad (30)$$

kde T [K] je termodynamická teplota a t [měsíc] je doba skladování.

Za ztráty kapacity vlivem vybíjecích cyklů je zodpovědná negativní elektroda článku. Pro tyto ztráty platí následující vztah:

$$Cycle_life_losses = k_1 \cdot N + k_2 \quad (31)$$

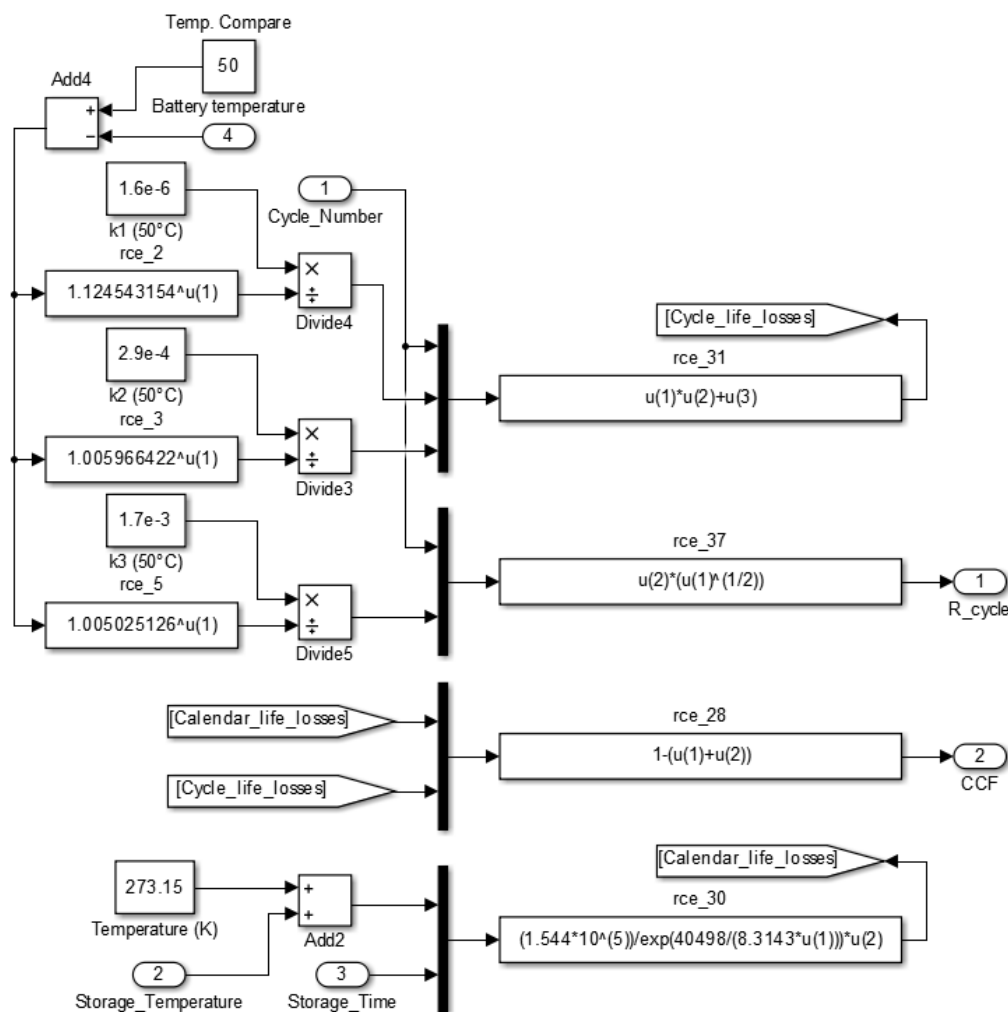
kde k_1 [cyklus⁻²] je koeficient, který se rapidně zvyšuje se zvyšující se teplotou při používání akumulátoru, N [cyklus] je počet cyklů a k_2 [cyklus⁻¹] je koeficient, který mírně roste s teplotou. Oba koeficienty však s teplotou rostou s druhou mocninou. Viz tabulka č. 6.

Teplota při používání článku	v_{bat}	[°C]	25	50
Koeficient k_1	k_1	[cyklus ⁻²]	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Koeficient k_2	k_2	[cyklus ⁻¹]	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
Koeficient k_3	k_3	[Ω/cyklus ^{1/2}]	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$

Tabulka č. 6: Koeficienty pro rovnice (31) a (37) závislé na aktuální teplotě akumulátorového článku

Koeficient k_3 se vztahuje k následující podkapitole (8.3.4. Změna vnitřní impedance článku) a k rovnici (37) popisující změnu dílčí rezistance článku.

Na následujícím obrázku č. 15 je subsystém v MATLAB/SIMULINK, který vypočítává vliv úbytku kapacity CCF a R_{cycle} , který je popsán v následující podkapitole (8.3.4. Změna vnitřní impedance článku). Všechny tři koeficienty jsou korigovány dle teploty (rostou se čtvercem teploty). Vstupními parametry pro subsystém jsou: aktuální teplota článku (při činnosti) v_{bat} [°C], skladovací teplota článku v_{str} [°C], doba skladování t [měsíc] a počet vybíjecích cyklů článku N [-].

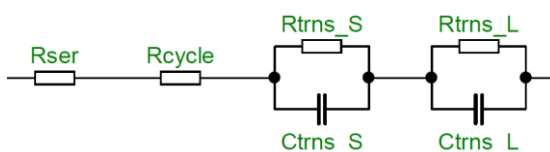


Obrázek č. 15: Výpočet úbytku kapacity CCF a R_{cycle} článku akumulátoru v MATLAB/SIMULINK

8.3.4. Změna vnitřní impedance článku

Vnitřní impedance článku se skládá ze sériového odporu R_{ser} [Ω], v sérii s R_{cycle} [Ω] a v sérii se dvěma RC články. První RC článek je paralelní spojení transientního odporu R_{trns_S} [Ω] a transientní kapacity C_{trns_S} [F]. Druhý RC článek je paralelní spojení transientního odporu R_{trns_L} [Ω] a transientní kapacity C_{trns_L} [F].

R_{ser} [Ω] představuje sériový odpor článku, na kterém vzniká úbytek napětí úměrný okamžitému proudu tekoucího článkem. R_{cycle} [Ω] představuje také sériový odpor článku, ten ale respektuje změnu sériového odporu během životnosti článku vlivem vybíjecích cyklů. Transientní složky odporů a kapacit reprezentují krátkodobější a dlouhodobější dynamické změny impedance článku. Náhradní schéma pro vnitřní impedanci článku je na následujícím obrázku č. 16:



Obrázek č. 16: Náhradní obvod pro výpočet impedance článku akumulátoru



Pro parametry součástek náhradního schématu platí následující empirické rovnice:

$$R_{ser}(SOC) = 0,1562 \cdot \exp(-24,37 \cdot SOC) + 0.07446 \quad (32)$$

$$R_{trn_S}(SOC) = 0,3208 \cdot \exp(-29,14 \cdot SOC) + 0.04669 \quad (33)$$

$$C_{trn_S}(SOC) = 752,9 \cdot \exp(-13,51 \cdot SOC) + 703,6 \quad (34)$$

$$R_{trn_L}(SOC) = 6,603 \cdot \exp(-155,2 \cdot SOC) + 0.04984 \quad (35)$$

$$C_{trn_L}(SOC) = -6056 \cdot \exp(-27,12 \cdot SOC) + 4475 \quad (36)$$

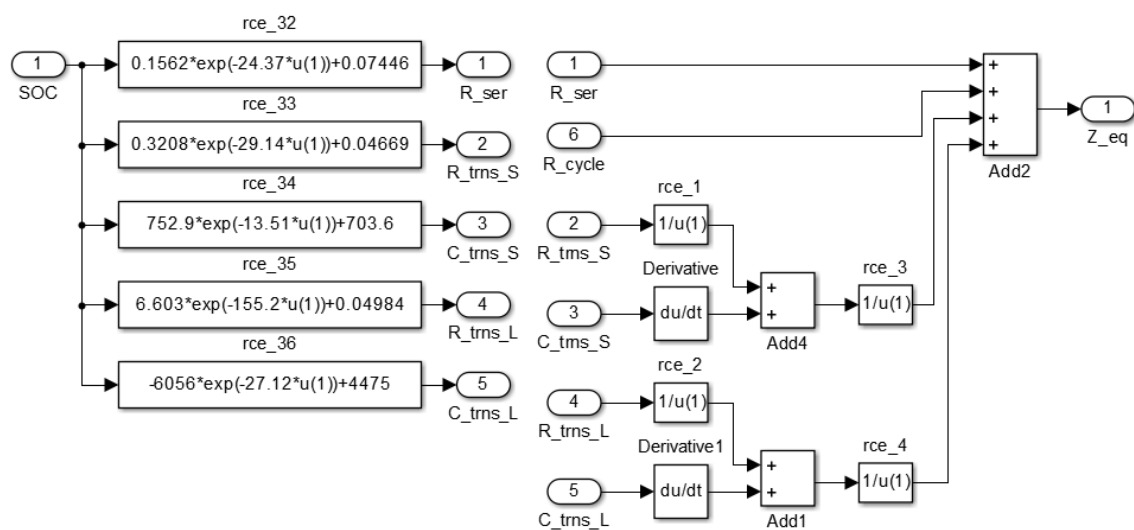
kde SOC [-] je stav nabití akumulátoru.

Odpor R_{cycle} [Ω] je velmi málo závislý na teplotě a podstatně více závislý na počtu vybíjecích cyklů, platí pro něj následující vztah:

$$R_{cycle} = k_3 \cdot N^{1/2} \quad (37)$$

kde k_3 [$\Omega/\text{cyklus}^{1/2}$] je koeficient, který má minimální závislost na teplotě a N [-] počet vybíjecích cyklů článku. Koeficient k_3 však s teplotou roste s druhou mocninou.

Na následujícím obrázku č. 17 jsou dva subsystémy. Jeden obsahuje rovnice (32) – (36) a druhý výpočet výsledné vnitřní impedance článku.

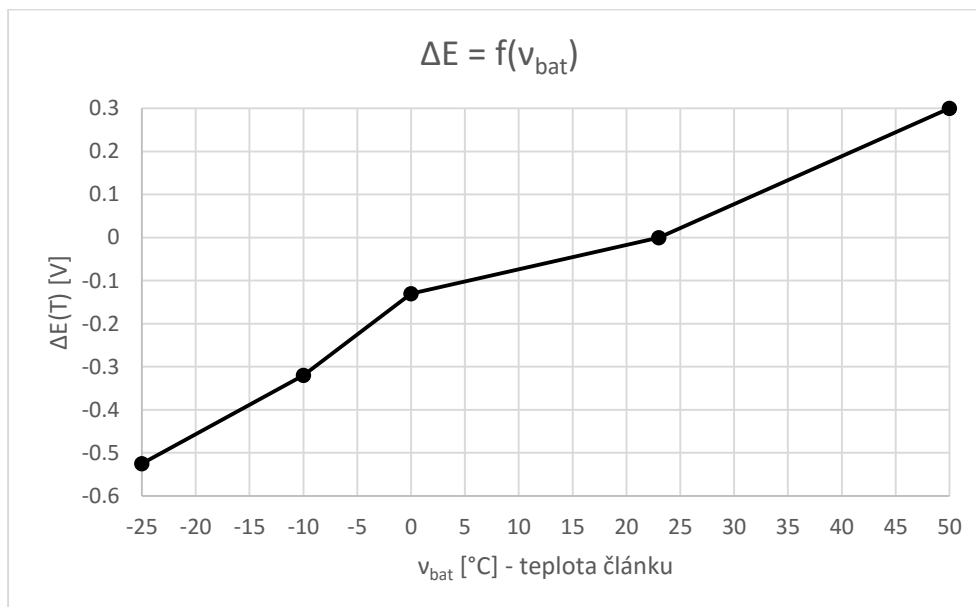


Obrázek č. 17: Výpočet impedance článku akumulátoru v MATLAB/SIMULINK



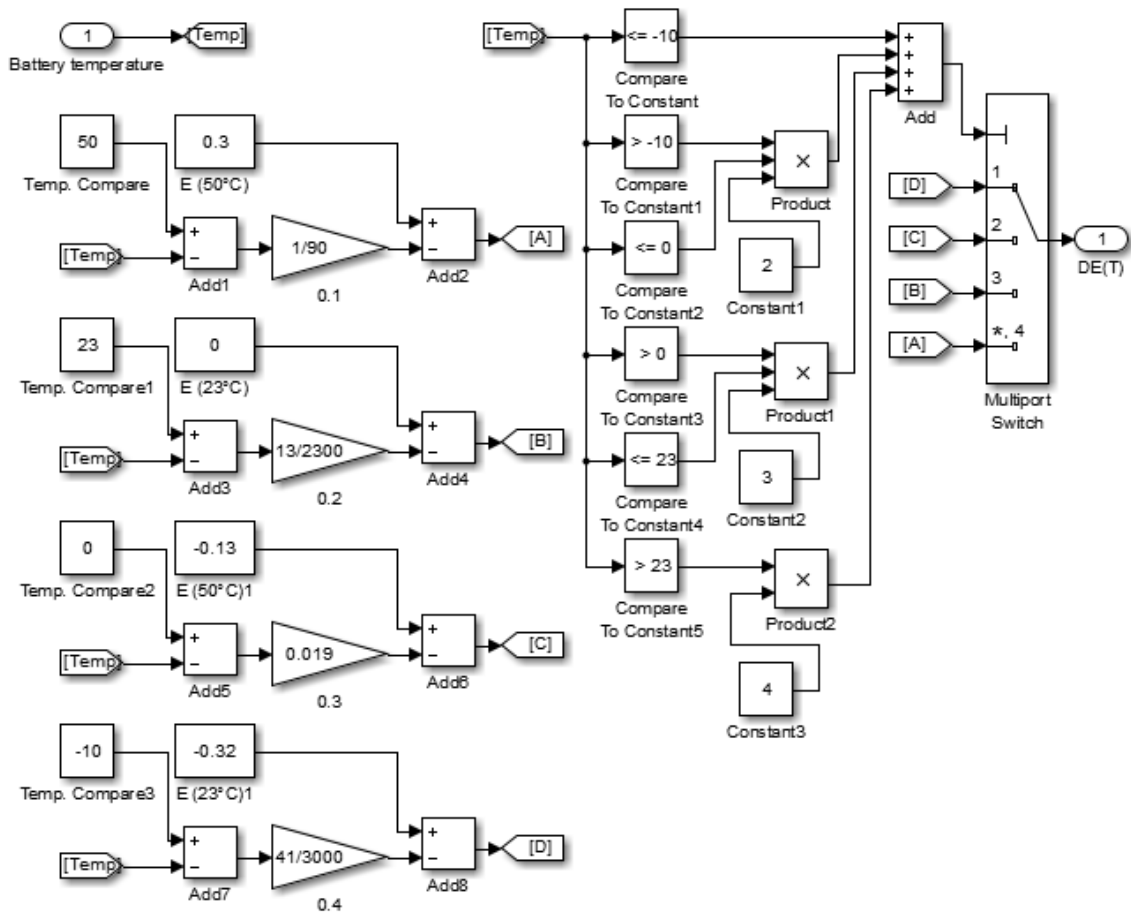
8.3.5. Výpočet teplotního koeficientu potenciálu článku

Parametr $\Delta E(T)$ [V] koriguje změnu vnitřního napětí článku v závislosti na jeho teplotě. Změřená závislost je patrná z následujícího grafu na obrázku č. 18 – vychází z práce [18]:



Obrázek č. 18: Korekce napětí pro určení teplotní závislosti napětí článku akumulátoru

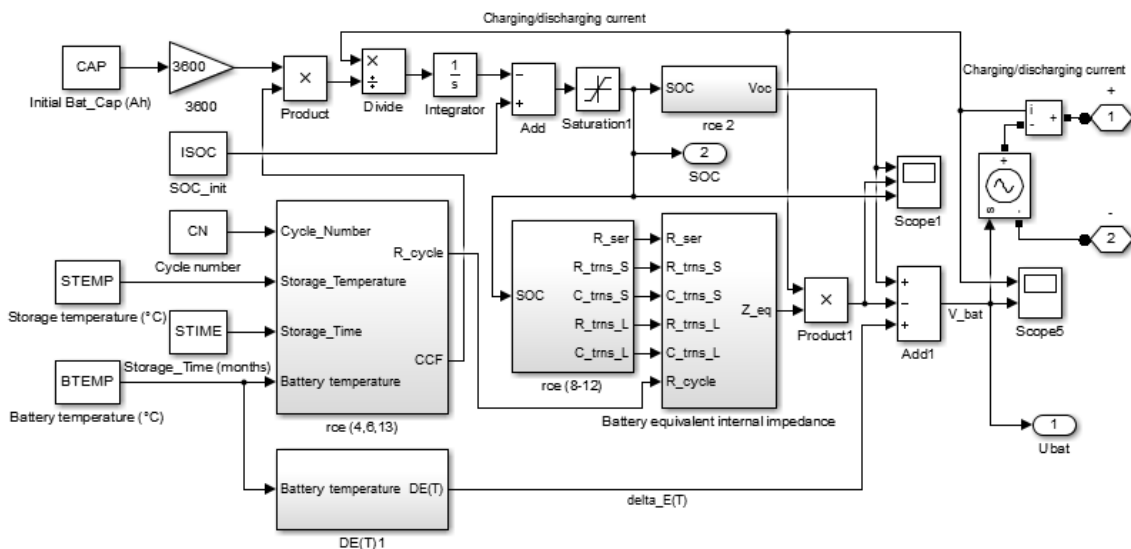
Subsystem v MATLAB/SYMLINK tuto závislost rozděljuje do čtyř lineárních částí, po kterých se pohybuje v závislosti na aktuální teplotě článku. Subsystem je na následujícím obrázku č. 19:



Obrázek č. 19: Výpočet teplotní závislosti korekčního členu napětí pro články akumulátoru v MATLAB/SIMULINK

8.3.6. Celkový model článku v MATLAB/SIMULINK

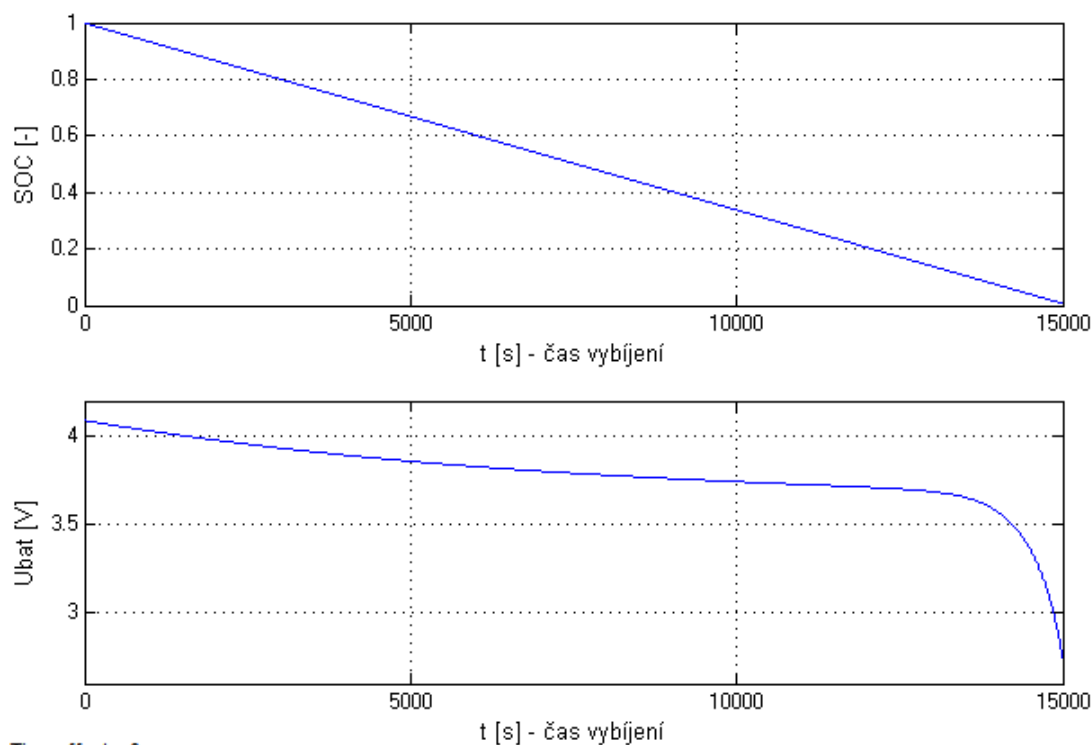
Výstupy předešlých subsystémů jsou vstupními hodnotami pro rovnice (25), (27) a (29). Celkový model článku v MATLAB/SIMULINK je pak na následujícím obrázku č. 20:



Obrázek č. 20: Celkový model článku akumulátoru v MATLAB/SIMULINK



Při simulaci jsem uvažoval zcela nový článek o kapacitě 2,1 Ah. Na následující obrázku č. 21 je vybíjecí charakteristika při vybíjecím proudu 0,5 A.



Obrázek č. 21: Vybíjecí charakteristika nového článku akumulátoru

Pro použití v elektromobilu je nutná sério-paralelní kombinace článků. Z důvodu požadovaného napětí cca 400 V na napěťovém meziobvodu jsem volil 100 článků do série, a z hlediska dostatečné kapacity celé baterie jsem volil 60 těchto sériových kombinací zapojených paralelně [20]. Parametry celé akumulátorové baterie lze samozřejmě měnit, viz následující tabulka č. 7, na které je maska celého subsystému.



Block Parameters: Battery_model	
(mask)	
Parameters	
Initial battery capacity (Ah)	2.1
Initial state of charge (0 up to 1)	1
Cycle number	10
Storage temperature (°C)	25
Storage time (months)	12
Battery temperature (°C)	45
Number of cells in parallel	60
Number of cells in series	100
OK	Cancel
Help	Apply

Tabulka č. 7: Maska subsystému "Battery_model" s parametry modelované akumulátorové baterie

9. Superkapacitor

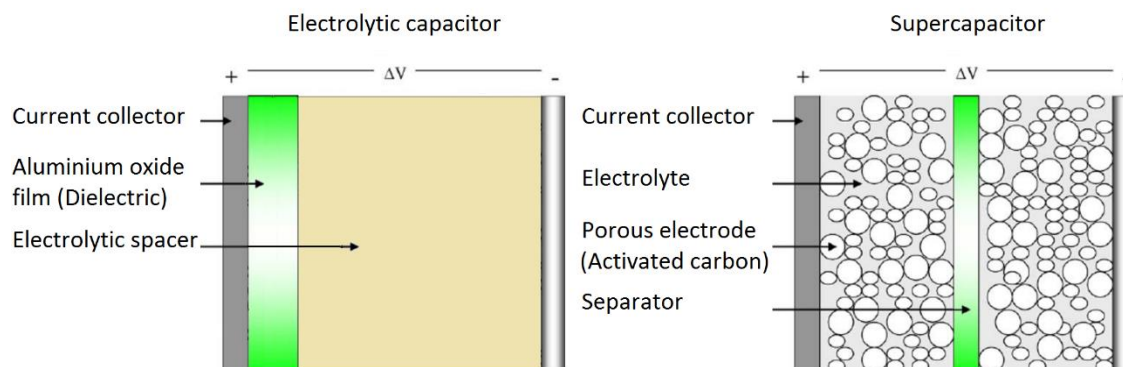
Při brzdění vozidla je kinetická energie elektromobilu v PMSM měněna zpět na elektrickou. Tuto energii můžeme zpět vrátit do akumulátoru (rekuperace), ale při intenzivním brzdění mohou být proudy tekoucí do akumulátoru natolik velké, že by se podstatná část energie zmařila na impedanci akumulátoru, který by byl současně proudově přetížen. Proto elektrický náboj, který v PMSM při intenzivním brzdění vzniká, svádíme částečně do superkapacitoru. energii uloženou v superkapacitoru použijeme znovu při rozjezdu vozidla, nebo při jeho akceleraci. Opět ve chvíli, kdy by mohl být akumulátor proudově přetížen. Účinnost rekuperace závisí na sériovém odporu superkapacitoru, vodivosti polovodičových prvků v měniči, na odporu vinutí PMSM atd. Celková účinnost rekuperace tak bývá zpravidla okolo 40 %. Další výhodou použití superkapacitoru v napěťovém meziobvodu elektromobilu je zvětšení celkové dynamiky vozidla.

9.1. Princip funkce superkapacitoru

Superkapacitor pracuje na podobném principu jako elektrolytický kondenzátor. Oproti elektrolytickému kondenzátoru je však vyroben rozdílnou – speciální technologií tak, aby v relativně malém objemu bylo dosaženo velkých kapacit dosahujících řádově hodnoty stovek až tisíců Faradů. Tato speciální technologie využívá tzv. elektrochemickou dvojvrstvu, která se skládá z elektrolytu a speciálního aktivního uhlíku. Superkapacity se proto také někdy označují jako EDLC (Electric Double Layer Capacitor). Energie se v superkapacitoru ukládá elektrostaticky, nedochází tedy k transformaci na jiný typ energie. Přiložením napětí na svorky



se záporné ionty začnou pohybovat směrem ke kladné elektrodě (kladné ionty k záporné elektrodě). Jak se konstrukčně liší superkapacitor oproti klasickému foliovému kondenzátoru je patrné z následujícího obrázku č. 22.



Obrázek č. 22: Rozdíl mezi vnitřní strukturou běžného elektrolytického kondenzátoru (vlevo) a superkapacitoru (vpravo)

Zásadní rozdíl mezi běžným kondenzátorem a superkapacitorem je velikost aktivní plochy elektrod. Zásadního zvětšení aktivní plochy elektrod se docílí vrstvou aktivního uhlíku nanesené na vnitřní strany hliníkových elektrod. Plocha elektrod je tak pórovitá, a tím několikanásobně zvětšena. Aktivní uhlík je prášek tvořený extrémně malými částicemi. Jeden gram prášku může mít plochu i 2000 m².

9.1.1. Typy uhlíkových vrstev

a) Uhlíkový aerogel (Carbon aerogel)

Aerogel je speciální materiál, který je v pevném stavu a vyznačuje se velmi nízkou hustotou. Tento materiál se vyrábí z tzv. uhlíkového gelu, kde se vysuší kapalná složka – póry jsou vyplněny vzduchem. Uhlíkové částičky uhlíkového aerogelu poskytují extrémně velkou plochu povrchu (okolo 600 m²/g – 1200 m²/g). Superkapacity s touto aktivní uhlíkovou vrstvou, o malé kapacitě, se často používají jako zálohovací napájení pro mikroelektroniku s malým příkonem.

b) Uhlíkové polymery (Carbon polymers)

Jde o chemicky odolný a mechanicky pevný materiál. Má velkou povrchovou viskozitu a umožňuje tak snadné nasáknutí elektrolytu. Uhlíkové polymery mají redukčně-oxidační paměťový mechanismus (reduction-oxidation storage mechanism) [21].

c) Uhlíkové nanotrubičky (Carbon nanotubes)

Nanotrubičky mají excelentní vlastnosti pro superkapacity. Vyznačují se výbornou pórovitostí (póry s velikostí jednotek nm). Velkou výhodou je, že miniaturní prostory uvnitř trubic mohou sloužit jako dielektrikum.

9.1.2. Vnitřní uspořádání

Jak je patrné z předešlého obrázku č. 23, elektrody jsou od sebe vzájemně odděleny pomocí separátoru (polypropylenová nebo celulósová fólie) a prostor mezi elektrodami

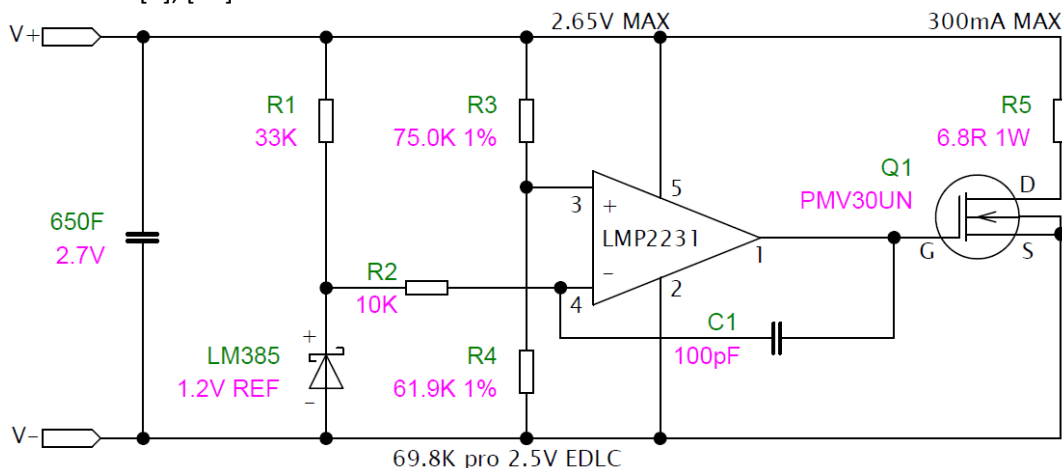


je vyplněn elektrolytem, který může být tekutý nebo ve formě gelu. Elektrolytem je kvartérní sůl (tetraethylamonium tetrafluoroborat) rozpuštěná v organickém rozpouštědle na bázi acetonitrilu (nitril kyseliny octové, metylkyanid - CH_3CN je bezbarvá aromatická kapalina s vysokou dielektrickou konstantou). Dalším rozdílem oproti běžnému kondenzátoru je vzdálenost elektrod, respektive síla dielektrika. Ta je podstatně zmenšena řádově na hodnoty až 10^{-10} m. Kapacita kondenzátoru obecně je dána vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (38)$$

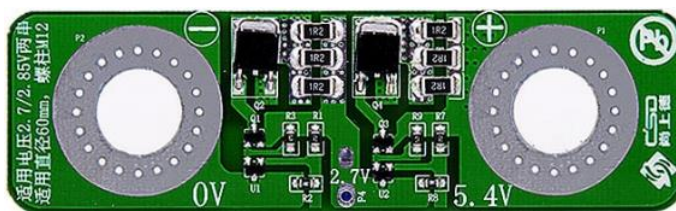
kde ε_0 [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$] je permitivita vakua, ε_r [-] je poměrná permitivita, což je materiálová konstanta použitého dielektrika, S [m^2] je aktivní plocha mezi deskami a d [m] je vzdálenost elektrod respektive tloušťka dielektrika.

Díky obrovské ploše elektrod a extrémně malé tloušťce dielektrika je dosaženo obrovské kapacity s malým sériovým odporem. Určitou nevýhodou tohoto uspořádání je poměrně nízké provozní napětí. To odpovídá extrémně tenké vrstvě a vlastnostem elektrolytu, kdy při vyšším napětí by mohlo dojít k průrazu dielektrické vrstvy. Provozní napětí pro nejčastěji používaný organický elektrolyt se pohybuje v rozmezí 2,3 V - 2,7 V. Obvykle je však nutné větší napětí, a to i v případě elektromobilu, proto je nutné superkapacitory řadit do série, což vede k použití balancérů. Obvykle totiž nemají všechny kondenzátory v sériové kombinaci stejnou hodnotu sériového odporu ESR, kapacitu a svodový proud. Mohlo by pak být na některých superkapacitorech zvětšené napětí, které by vedlo k jejich průrazu nebo snížení životnosti. V oblasti elektromobility se vzhledem k dynamice celého systému používají u superkapacitorů aktivní balancéry. Každý superkapacitor má svůj aktivní balancér. Ten obsahuje komparátor, který porovnává maximální povolené napětí na daném superkapacitoru se skutečnou hodnotou. Dojde-li k překročení této hodnoty, je okamžitě připnut tranzistorem paralelní vybíjecí rezistor s velikostí v řádech Ohmů. Tranzistor se otvírá postupně tak, aby bylo na daném superkapacitoru maximální napětí, ale nebyla překročena jeho povolená hodnota. Příklad zapojení aktivního balancéru je na následujícím obrázku č. 23 [9], [10]:



Obrázek č. 23: Reálné schéma zapojení aktivního balancéru

Napájecí napětí komparátoru je pouze 1,6V. V praxi se pak tyto aktivní balancéry dělají ve dvojicích, na společné desce připravené přímo na montáž na dvojici superkapacitorů. Viz následující obrázek č. 24 (upraveno z [11]):



Obrázek č. 24: Dvojice aktivních balancérů na společné desce

Výsledné uspořádání superkapacitorové baterie může vypadat jako na následujícím obrázku č. 25 (upraveno z [12]):



Obrázek č. 25: Příklad reálné superkapacitorové baterie

Nevýhodou řazení kondenzátorů do série je snižování celkové kapacity. Viz následující vzorec:

$$C_{ser_celk} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}} \quad (39)$$

kde n [-] je počet kondenzátorů v sérii a C_k [F] kapacita k-tého kondenzátoru.

9.2. Vlastnosti superkapacitoru

Superkapacitor má vyšší energetickou hustotu než běžný kondenzátor, ale nedosahuje hodnot běžných akumulátorů. Protože je v superkapacitoru energie uložena elektrostaticky, je schopen ji rychle uvolnit nebo přijmout, a to s velkou účinností a minimálním „opotrebením“. To však o akumulátorech říci nelze. Dynamika vybíjení i nabíjení je u akumulátorů nižší, protože se elektrická energie přeměňuje na chemickou a zpět. To vede k větším ztrátám oproti superkapacitoru. Z chemického hlediska není každý cyklus identický, a tak dochází k postupnému „opotrebování“ akumulátoru a ke snižování jeho kapacity. Celková životnost je pak u akumulátoru podstatně nižší, než u superkapacitoru. Porovnání s elektrolytickým kondenzátorem a olověným akumulátorem je na následující tabulce č. 8:



		Elektrolyt. kond.	Superkondenzátor	Olověný akumulátor
Nabíjecí doba	[h, s]	$10^3 - 10^6$ s	0.3 - 30 s	1 - 6 h
Vybíjecí doba	[h, s]	$10^3 - 10^6$ s	0.3 - 30 s	0.3 - 3 h
Energetická hustota	[Wh.kg ⁻¹]	< 0.1	1 - 10	10 - 100
Životnost	[cyklus]	> 500 000	> 500 000	1 000
Účinnost jednoho cyklu	[-]	> 0.95	0.85 - 0.98	0.7 - 0.85

Tabulka č. 8: Porovnání základních hodnot běžného elektrolytického kondenzátoru, superkapacitoru a olověného akumulátoru

9.3. Model superkapacitoru

Model superkapacitoru vychází z obecných rovnic, shodných pro běžné kondenzátory.

$$Q = C \cdot U \quad (40)$$

kde Q [C] je elektrický náboj uložený v kondenzátoru, C [F] je kapacita kondenzátoru a U [V] je napětí na kondenzátoru.

$$Q = I \cdot t \quad (41)$$

kde Q [C] je elektrický náboj uložený v kondenzátoru, I [A] je proud protékající kondenzátorem a t [s] je čas, po který proud protéká kondenzátorem.

Pro hodnotu SOC (State of charge) udávající stav nabití kondenzátoru (od 0 do 1) lze na základě rovnic (40) a (41) psát:

$$SOC = \frac{Q_{skut}}{Q_{celk}} = \frac{\int i dt + Q_{init}}{U_n \cdot C} \quad (42)$$

kde Q_{skut} [C] je aktuální elektrický náboj uložený v kondenzátoru, Q_{celk} [C] je náboj, který je kondenzátor schopen pojmout, i [A] je proud protékající kondenzátorem, Q_{init} [C] je počáteční náboj uložený v kondenzátoru a U_n [V] je jmenovité napětí kondenzátoru.

Oproti ideálnímu kondenzátoru má reálný kondenzátor sériový odpor ESR, jehož hodnota se v průběhu životnosti může zvyšovat. Zásadní vliv na jeho zvyšování v průběhu životnosti má teplota, při které je superkapacitor provozován. Reálný kondenzátor oproti ideálnímu obsahuje též paralelní (svodový odpor), ten se však v technických listech (datasheet) obvykle neudává, ale udává se hodnota svodového proudu (Leakage current). Hodnota svodového proudu se udává pro zcela nabitý superkapacitor. Proto je při výpočtu skutečného svodového proudu nutné, přepočítat jej k hodnotě napětí na superkapacitoru.

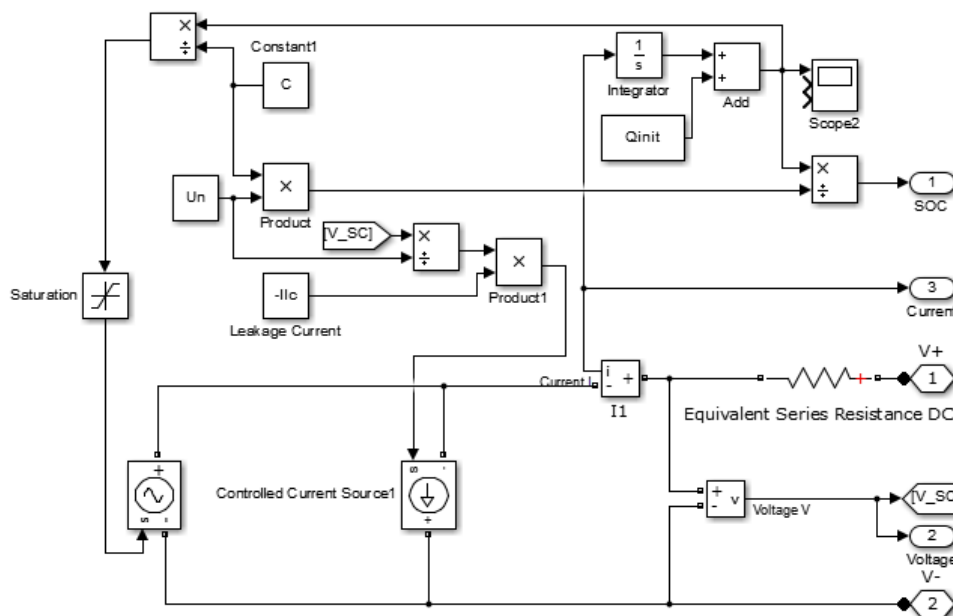
$$i_{sv} = i_{leakage_current} \cdot \frac{u_{skut}}{U_n} \quad (43)$$



kde $i_{leakage_current}$ [A] je svodový proud udávaný v technických listech (datasheet) pro zcela nabitý superkapacitor a u_{skut} [V] je aktuální napětí na superkapacitoru.

9.3.1. Celkový model v MATLAB/SIMULINK

Na základě náhradního schéma pro reálný kondenzátor a rovnic (40) – (43) byl sestrojen následující model superkapacitoru, viz obrázek č. 26:



Obrázek č. 26: Model superkapacitoru v MATLAB/SIMULINK

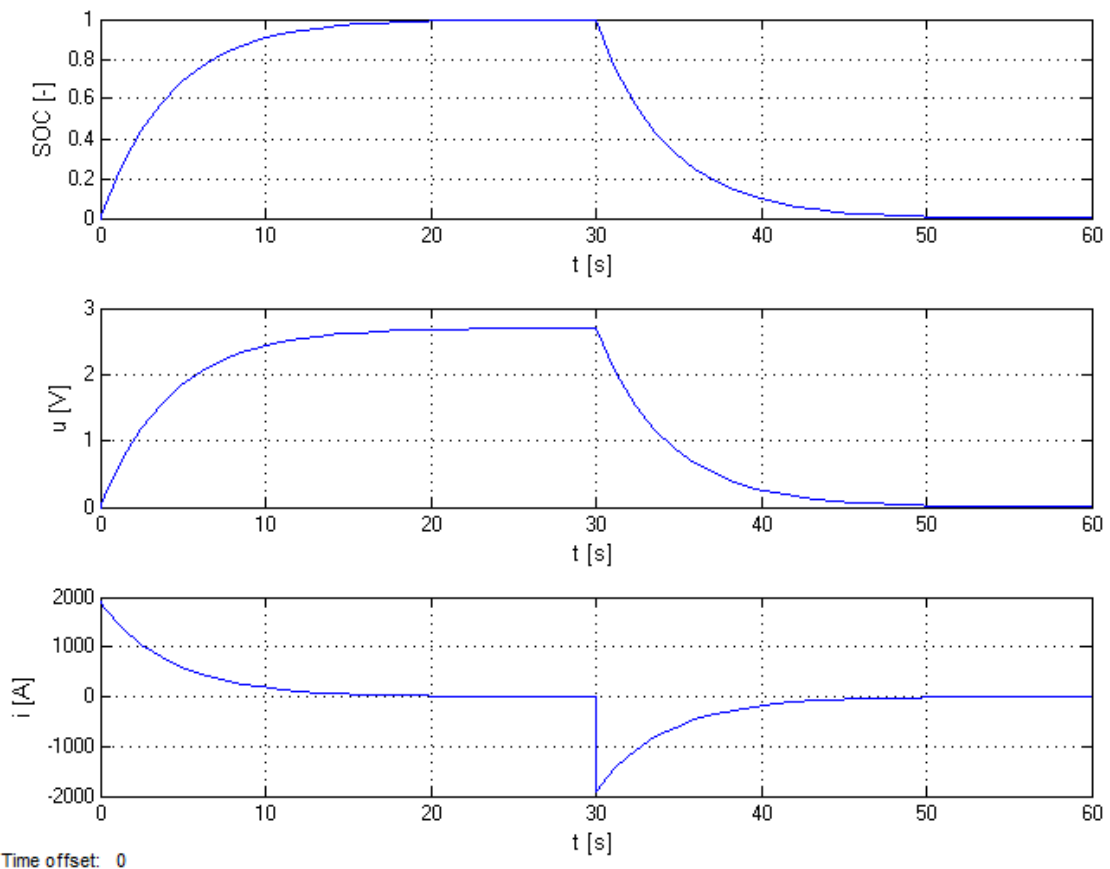
Pro simulovaný model superkapacitoru byl zvolen Maxwell BCAP3000. Jeho parametry jsou v tabulce č. 9 (maska subsystému „Supercapacitor“):

Block Parameters: Supercapacitor1	
(mask)	
Parameters	
Q init [C]	0
Capacitance [F]	3000
Voltage nominal [V]	2.7
Leakage current [A]	5.2e-3
ESR [Ohm]	0.29e-3
Maximum current [A]	1900

Tabulka č. 9: Parametry superkapacitoru Maxwell BCAP3000



Výsledky simulace – vybíjecí a nabíjecí charakteristiky jsou na následujícím obrázku č. 27:



Obrázek č. 27: Nabíjecí/vybíjecí charakteristiky modelovaného superkapacitoru Maxwell BCAP3000

Pro dosažení dostatečného napětí a energie, kterou je superkapacitorová baterie schopna pojmout, jsem volil sériovou kombinaci 30 superkapacitorů. Výsledné jmenovité napětí superkapacitorové baterie je 81 V.

10. Měniče

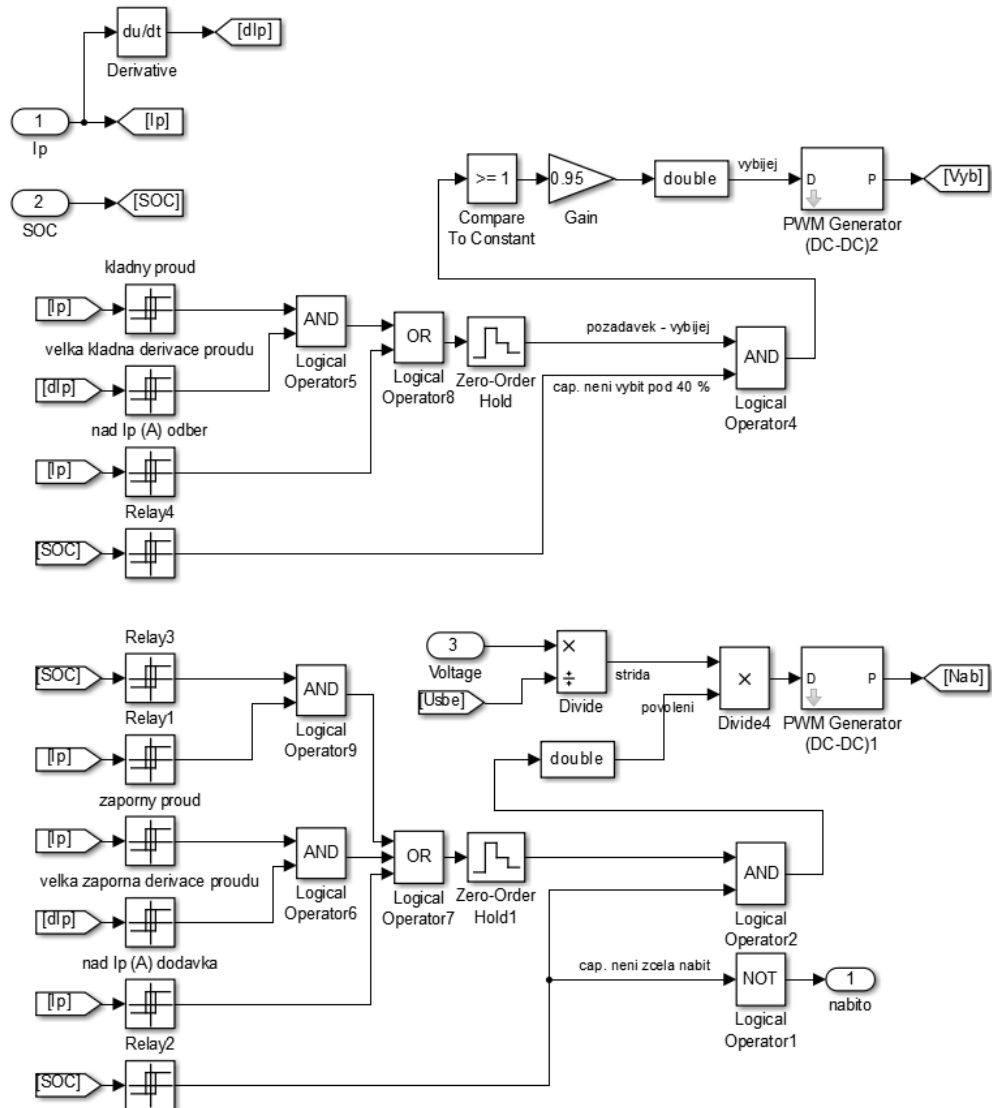
Jak je patrné z předešlých průběhů pro napětí a SOC, napětí na superkapacitoru odpovídá stupni jeho nabití, a také vzhledem ke jmenovitému napětí napěťového meziobvodu 420 V, je nutné superkapacitor do meziobvodu připojit přes z jedné strany snižující a z druhé zvyšující měnič napětí.

10.1. Zvyšovací DC/DC měnič

Zvyšovací DC/DC měnič (Booster) je pulzní měnič, jehož základem je cívka $L1$ a výkonový tranzistor $M1$, který slouží jako spínač. V okamžiku, kdy je tranzistor sepnut, teče přes cívku proud. Během této fáze cívka uloží energii do svého magnetického pole ($W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$). Proud tekoucí cívkou je vždy spojitý, a proto v okamžiku, kdy se tranzistor rozezne, má cívka vlivem své indukčnosti snahu zachovat stejnou hodnotu protékaného proudu. Z naakumulované energie magnetického pole se na ní naindukuje napětí - tzv. „Peak“. Tato napěťová špička protlačí proud



Dalším požadavkem pro nabíjení superkapacitoru je to, aby byl neustále nabit na hodnotu SOC 0,7 pro případ náhlé akcelerace. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na to, aby v superkapacitoru zůstal dostatek energie jak pro akceleraci, tak pro případnou rekuperaci. Další možností, kdy bude superkapacitor vybíjen nebo nabíjen, je situace, kdy je sice derivace proudu malá, avšak hodnota proudu je natolik velká, že by byl přetěžován akumulátor. Logika řízení včetně PWM subsystémů v MATLAB/SIMULINK je na následujícím obrázku č. 30:



Obrázek č. 30: Logika řízení DC/DC měniče včetně PWM subsystémů

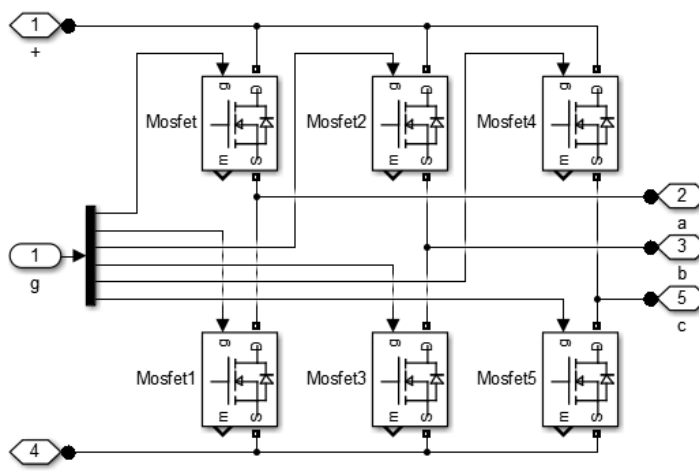
10.4. Měnič pro PMSM

Z důvodu řízení brzdného účinku (při rekuperaci) je nutné mezi napěťový meziobvod a střídač PMSM zařadit ještě DC/DC booster. Ten je při motorickém chodu PMSM (směr toku energie je do PMSM) neaktivní – dioda je přemostěna antiparalelním tranzistorem, který je v tomto režimu sepnutý.

Z DC/DC boosteru je napájen DC/AC měnič PMSM. Řízení tohoto měniče bylo popsáno v předešlých kapitolách o vektorovém řízení. Jde v podstatě o střídač a současně usměrňovač



v případě, že tok výkonu teče opačným směrem – při rekuperaci. Tento měnič sestává z plně říditelných součástek (MOSFET, IGBT) a diod. Vždy dva tranzistory pro jednu fázi. Tranzistory pracují jako spínače a danou fázi vždy připojí na kladný nebo záporný pól sběrnice. Postupným řízeným spínáním lze vytvořit proudový signál požadované frekvence a amplitudy v každé fázi. Pokud takto vytvoříme tři signály, které jsou vzájemně fázově posunuty o $2\pi/3$ rad, v PMSM vznikne točivé magnetické pole. Výkonová část měniče je na následujícím obrázku č. 31:

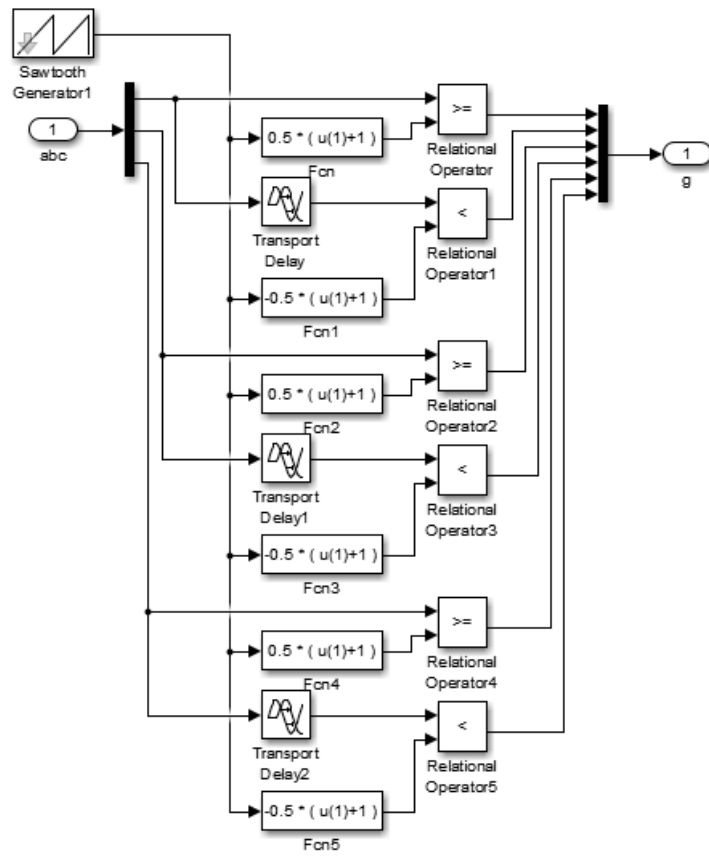


Obrázek č. 31: Silová část střídače pro PMSM

10.4.1. PWM

Pulsně šířková modulace (PWM) je založena na principu porovnávání dvou signálů. Signálu požadovaného a vysokofrekvenčního nosného. Nosný signál bývá například pila o frekvenci cca 2 kHz – 5 kHz. Požadovaný signál bývá sinusový. Okamžitá hodnota sinusovky se porovná s okamžitou hodnotou pily. V okamžiku, kdy je okamžitá hodnota sinu větší, než okamžitá hodnota nosného signálu, komparátor přepoklopí na logickou 1 (vysoký logický signál). Respektive v okamžiku, kdy je okamžitá hodnota požadovaného signálu menší, než okamžitá hodnota pily, komparátor přepoklopí na logickou 0 (nízký logický signál). Tyto logické stavy se přenáší na gaty (hradla) tranzistorů (v praxi přes zesilovací členy, které jsou schopné injektovat nebo odsávat náboj na hradle součástky). Je nutné ještě ošetřit tzv. dead time, tedy čas zabezpečující sepnutí tranzistoru v době, kdy je bezpečně vypnut druhý tranzistor ve stejné větvi (pro danou fázi). Jinak by mohlo dojít k přímému zkratu napěťové sběrnice díky současnému vedení proudu obou tranzistorů dané větve. Tuto ochrannou funkci zabezpečuje blok Transport_Delay. Dead time jsem nastavil 250 μ s, což je zcela bezpečné s ohledem na přepokládaný vypínací čas tranzistorů kolem 50 μ s.

Vzhledem k indukčnosti zátěže bude proud na rozdíl od napětí spojitý a výsledný průběh proudu bude rekonstrukcí požadovaného signálu. Frekvenci pily jsem zvolil 5 kHz, PWM v MATLAB/SIMULINK je na následujícím obrázku č. 32:

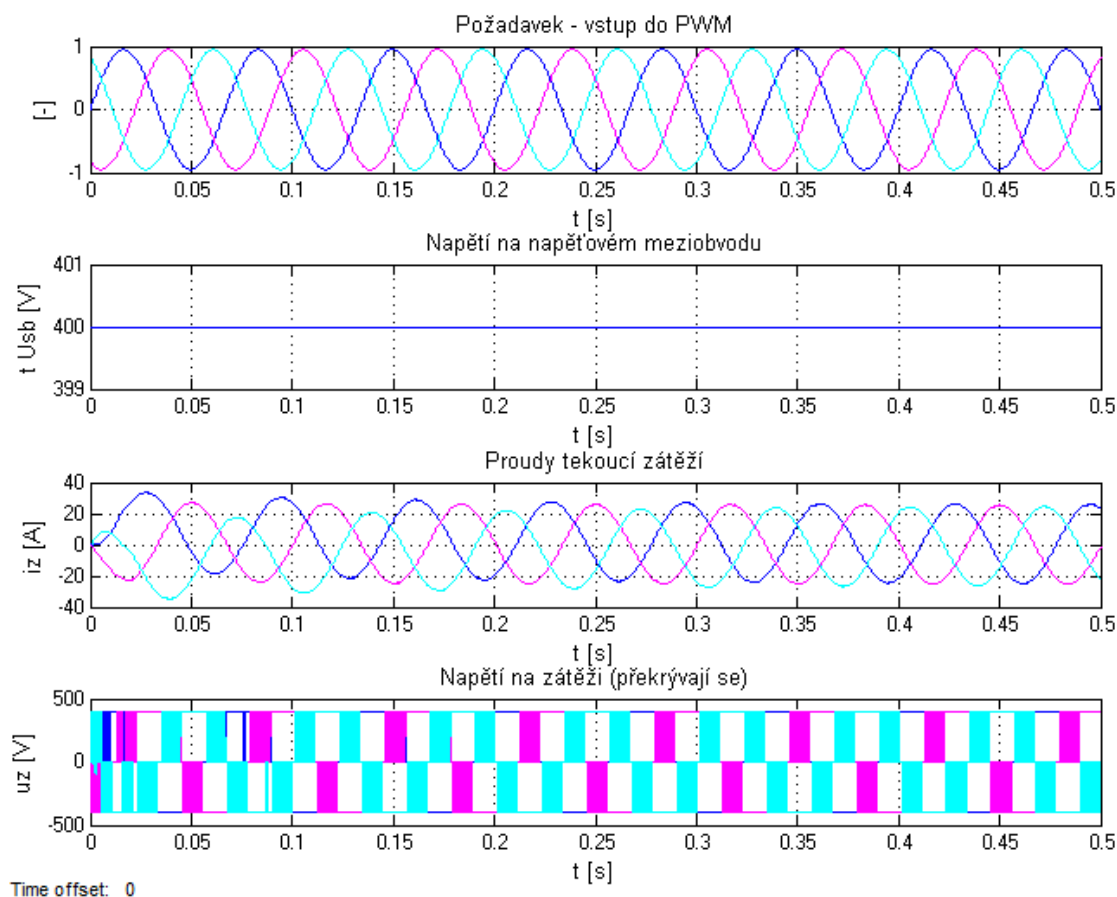


Obrázek č. 32: PWM pro střídač PMSM



10.4.2. Simulace měniče pro PMSM

Příklad nasimulovaných průběhů celého DC/AC měniče, pro otestování funkčnosti, je na následujícím obrázku č. 33:



Obrázek č. 33: Ověření funkce střídače pro PMSM

11. Jízdní cyklus NEDC

Určení spotřeby elektrické energie elektromobilu je nutné provést za jasně definovaných podmínek. V Evropě se k tomuto účelu běžně používá tzv. NEDC. Model elektromobilu je připraven pracovat s libovolným jízdním cyklem. Tento byl vybrán s ohledem na snadné porovnání výsledků s jinými vozy.

Jízdní cyklus NEDC (The New European Driving Cycle), též ECE cyklus, byl vytvořen pro porovnávání emisí konkrétních typů automobilů. Ale podle tohoto cyklu je možné definovat i spotřebu automobilu, a to i elektromobilu. Výsledky založené na tomto jízdním cyklu jsou pak porovnatelné s hodnotami ostatních automobilů. Jde o přesně definovaný rychlostní profil tvořený čtyřmi po sobě následujícími jízdními cykly ECE-15 (UDC), které reprezentují městský provoz a jedním jízdním cyklem EUDC, který reprezentuje jízdu po dálnici (mimoměstská část jízdního cyklu). Městská část cyklu obsahuje 15 fází („volnoběh“, zrychlení, stálá rychlost, zpomalení, atd.). Mimoměstská část cyklu je tvořena stejnými fázemi jako městská část cyklu,



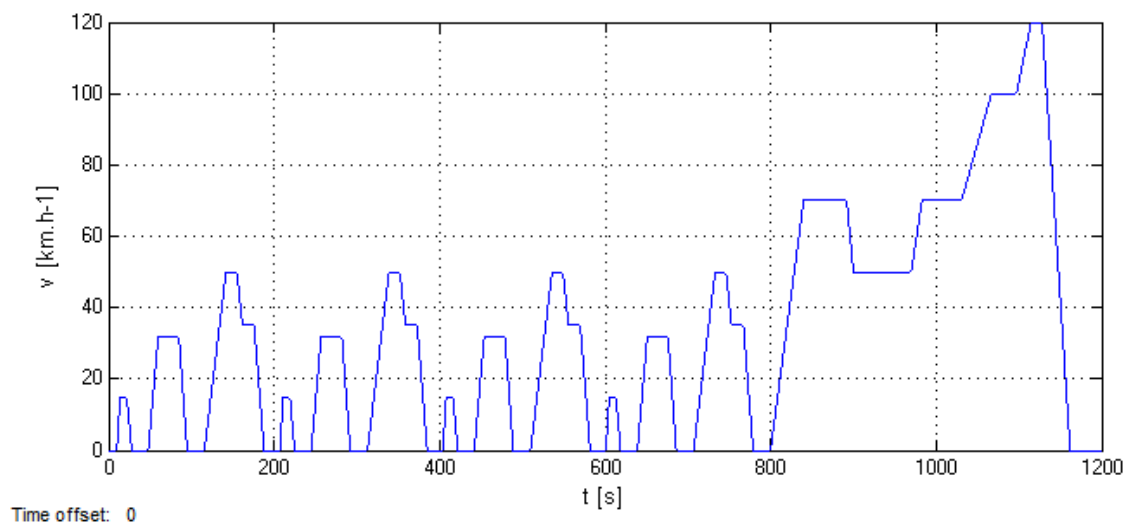
ale fázi je 13. Celková vzdálenost NEDC je 11 km. Další informace o obou částech NEDC jsou v následující tabulce č. 10 [17]:

		ECE-15	EUDC
Vzdálenost	[km]	4x1.013=4.052	6.955
Doba trvání	[s]	4x195=780	400
Průměrná rychlost	[km.h ⁻¹]	18.7 (včetně "volnoběhu")	62.6
Maximální rychlost	[km.h ⁻¹]	50	120

Tabulka č. 10: Popis dílčích jízdních cyklů NEDC

11.1.1. Výsledný průběh NEDC

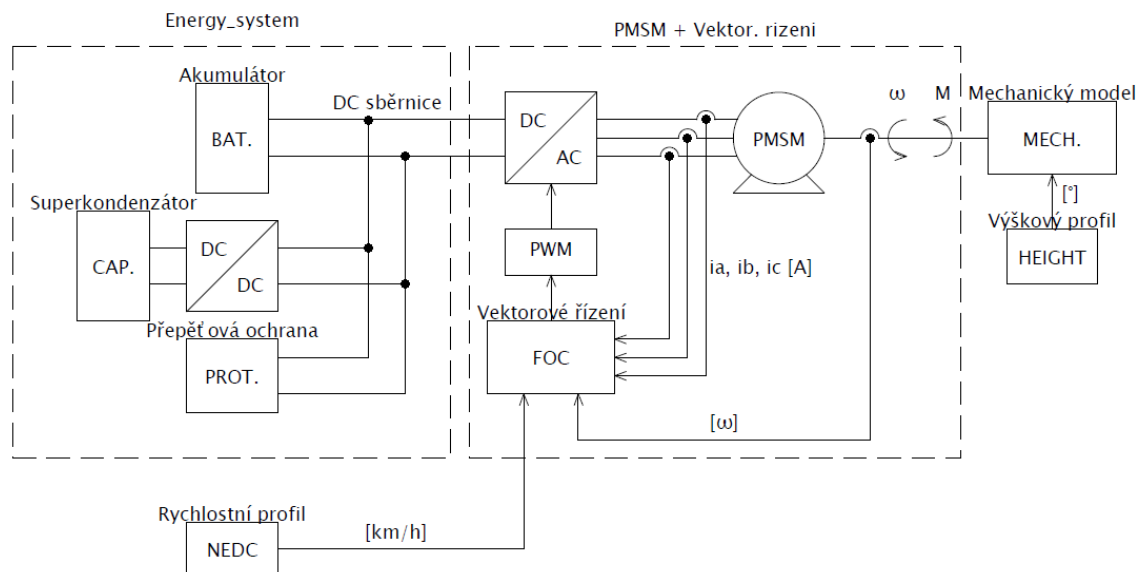
Pomocí bloku „Lookup Table“ v MATLAB/SIMULINK byl vytvořen požadovaný průběh rychlostního profilu použitého pro určování spotřeby mnou modelovaného elektromobilu. Viz obrázek č. 34.



Obrázek č. 34: Rychlostí profil - jízdní cyklus NEDC

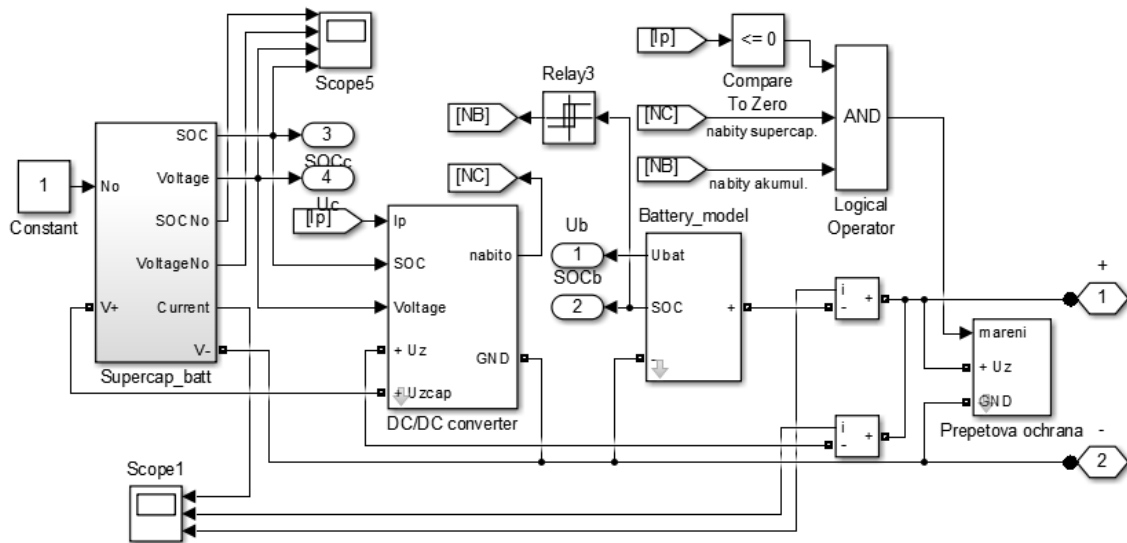
12. Celkový model elektromobilu

Z výše popsaných subsystémů byl sestaven výsledný model elektromobilu. Po nastavení veškerých požadovaných parametrů jednotlivých subsystémů jsou pro výsledný model pouze dvě proměnné veličiny, a to rychlostní profil – v našem případě NEDC a výškový profil, respektive profil sklonu vozovky. Výstupem jsou pak průběhy SOC akumulátoru i superkapacitoru. Na základě zbytkových hodnot SOC obou komponent lze určit celkovou spotřebu vozidla za daných okolností. Obecné blokové schéma celého elektromobilu je na následujícím obrázku č. 35:



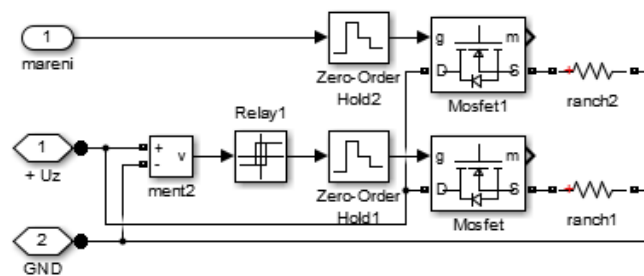
Obrázek č. 35: Obecné blokové schéma silové části elektromobilu

Výsledný model odpovídá obecnému schématu, ale z hlediska náročnosti výpočtů bylo nutné výsledný model zjednodušit. Výsledný model neobsahuje střídač s PWM. Stejnoseměrný proud odebíraný střídačem je vypočítáván přímo v subsystému vektorového řízení. Celý model je pak ještě rozdělen do dvou větších subsystémů, jak je naznačeno přerušovanou čarou na obrázku č. 35. Subsystém „PMSM + Vektor. řízení“ je popsáno v kapitole 6.2.8. Model vektorového řízení. Subsystém „Energy_system“ je napěťovým meziobvodem tvořeným propojením modelu akumulátorové baterie, superkapacitoru a DC/DC měniče pro nabíjení a vybíjení superkapacitoru. V tomto subsystému je ještě přepětová ochrana (obrázek č. 37), která při překročení nastaveného napětí (např. 440 V) připne odporník určený k maření přebytečné energie. V okamžiku, kdy je zcela nabit akumulátor i superkapacitor, a přitom dojde ke generátorickému brzdění vozidla, kdy PMSM energii dodává do systému, se připne odporník o větší rezistivitě. Vozidlo tak v takové situaci brzdí přímo do tohoto odporníku. Nestačí-li však přebytečnou energii mařit v teplo, začne docházet ke zvyšování napětí na sběrnici, což povede k připnutí hlavního – přepětového odporníku. Subsystém „Energy_system“ je na následujícím obrázku č. 36:



Obrázek č. 36: Napěťový meziobvod v MATLAB/SIMULINK

Subsystém „Prepetova ochrana“ je na obrázku č. 37:



Obrázek č. 37: Jednoduchá přepětová ochrana napěťového meziobvodu – odporník pro maření nevyužitelné brzdné energie

13. Výsledky simulací elektromobilu

Výsledkem simulace by mělo být určení spotřeby elektromobilu po projetí rychlostního profilu NEDC, při stoupání 0°. Maximální energie, kterou lze uložit do akumulátorové baterie, je dána vztahem:

$$E_{aku} = C_{clanku} \cdot U_{n_clanku} \cdot p_p \cdot p_s \cdot 10^{-3} \quad (44)$$

kde E_{aku} [kWh] je maximální energie akumulátorové baterie, C_{clanku} [Ah] je kapacita jednoho článku, U_{n_clanku} [V] je jmenovité napětí jednoho článku, p_p [-] je počet paralelních větví a p_s [-] je počet článků v sérii každé paralelní větve.

$$E_{aku} = 2,1 \cdot 3,7 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 46,62 \text{ kWh} \quad (45)$$

Pro maximální uloženou energii v superkapacitoru platí:



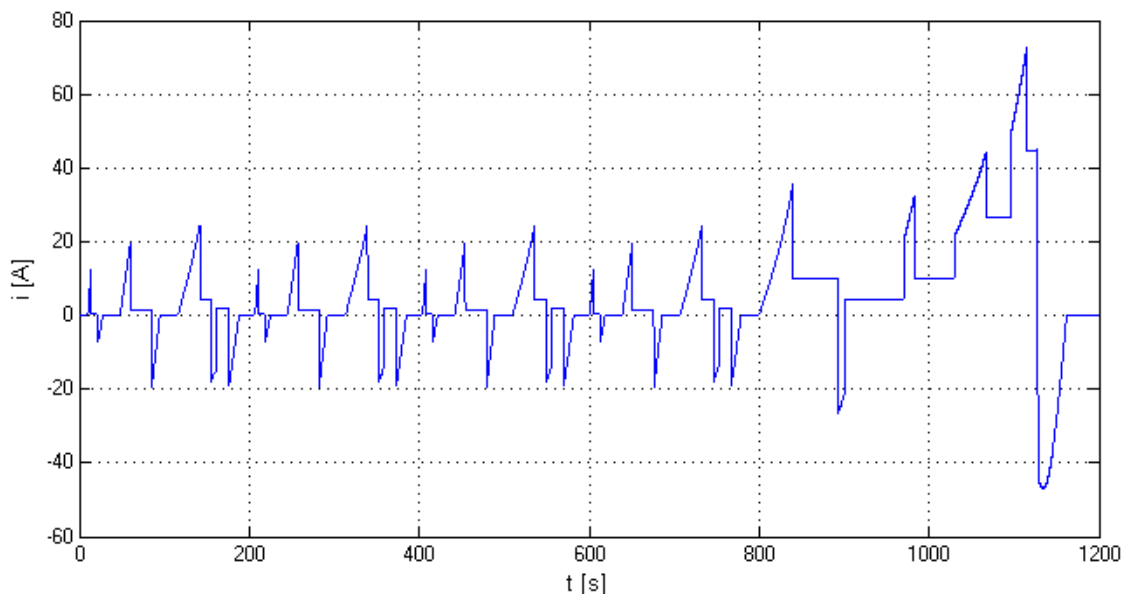
$$E_{cap} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_{cl} \cdot U_{max_cl}^2 \cdot p_s}{3,6 \cdot 10^6} \quad (46)$$

kde E_{cap} [kWh] je maximální energie superkapacitorové baterie, C_{cl} [F] je kapacita jednoho superkapacitoru, U_{max} [V] je maximální napětí jednoho superkapacitoru a p_s [-] je počet superkapacitorů v sérii.

$$E_{cap} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot 2,7^2 \cdot 30}{3,6 \cdot 10^6} = 0,0911 \text{ kWh} \quad (47)$$

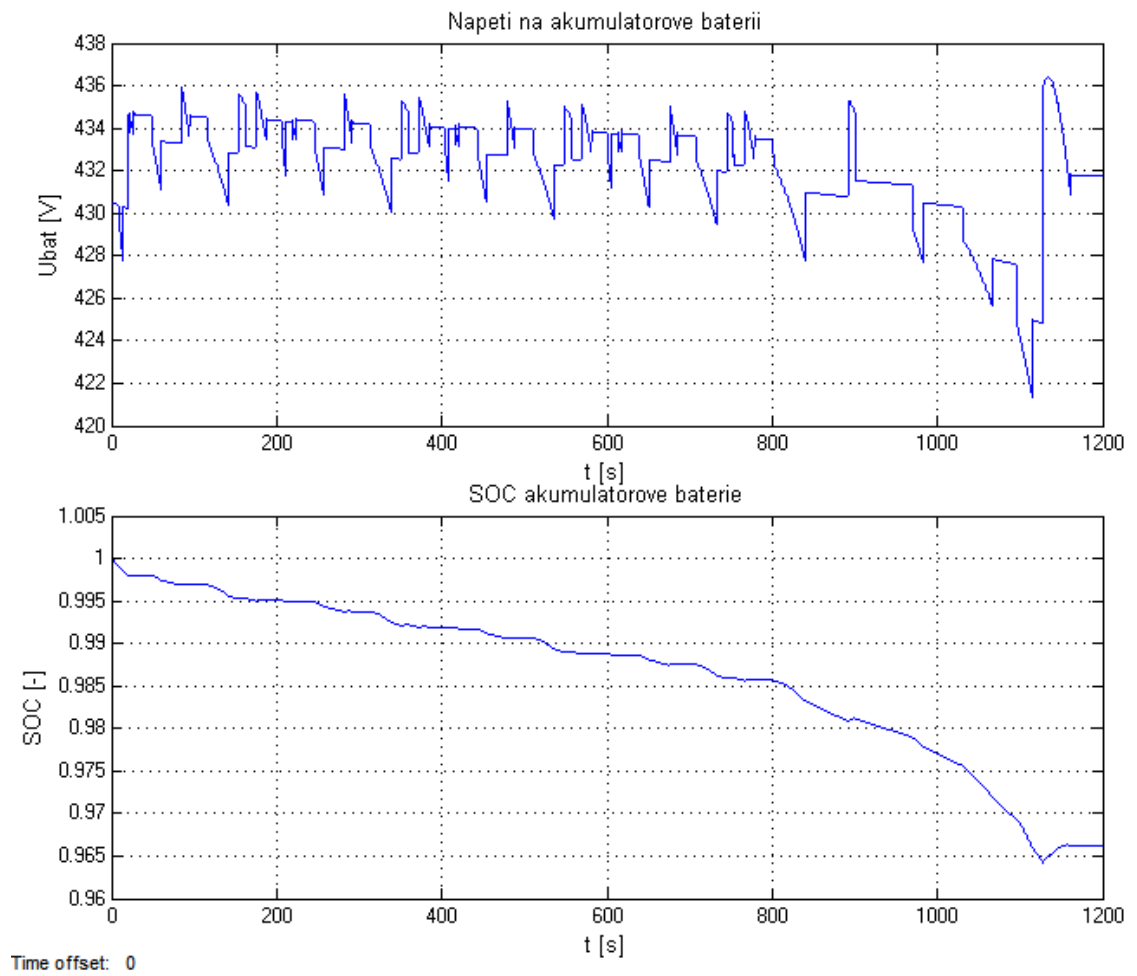
Vzhledem k maximální uložené energii v akumulátoru je maximální energie uložená v superkapacitoru pouze 0,195 %. Proto tedy při výpočtu spotřeby elektromobilu nemusíme uvažovat konečný SOC superkapacitoru, urazí-li vozidlo při daném jízdním cyklu dostatečnou vzdálenost – což je při použití NEDC splněno.

Na následujícím obrázku č. 38 je průběh proudu, kterým je zatěžován napěťový meziobvod při NEDC a 0° stoupání vozovky:



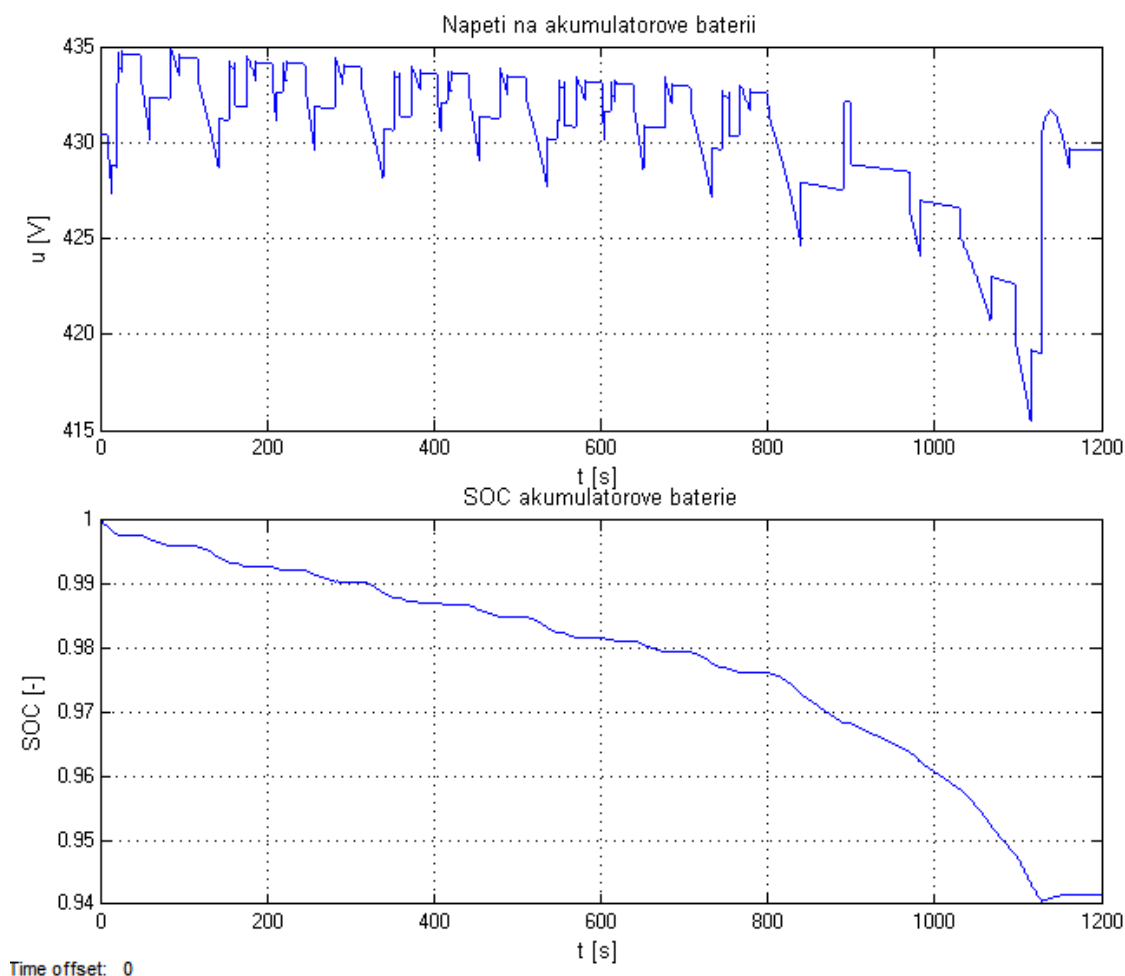
Obrázek č. 38: Proud tekoucí střídačem na DC straně při NEDC a 0° stoupání vozovky

Na následujícím obrázku č. 39 je průběh napětí a SOC na akumulátorové baterii při NEDC (0° stoupání vozovky). Za daných podmínek je ze SOC určena spotřeba elektromobilu.



Obrázek č. 39: Průběh napětí na akumulátorové baterii a její SOC při stoupání vozovky 0°

Pro názornost výsledku byla ještě určena spotřeba vozidla při stoupání do kopce o sklonu $1,5^\circ$. Viz obrázek č. 40.



Obrázek č. 40: Průběh napětí na akumulátorové baterii a její SOC při stoupání vozovky 1,5°

Výsledná spotřeba elektromobilu je v následující tabulce č. 11:

Stoupání	SOC	1 - SOC	Spotřeba		Převýšení/100 km	Potenciálová energie/100 km	
			[kWh/NEDC(11 km)]	[kWh/100 km]		[MJ]	[kWh]
0	0.9661	0.0339	1.58	14.37	0	0	0
1.5	0.9424	0.0576	2.69	24.41	2618.6	25.69	7.14

Tabulka č. 11: Tabulka s vyčíslením výsledné spotřeby elektromobilu a případné potenciálové energie, kterou vozidlo získalo stoupáním

Pro porovnání výsledků s běžným vozidlem se spalovacím motorem je zde následující tabulka č. 12:

Měrná energie benzínu	Účinnost běžného spalovacího motoru	Spotřeba	
		[kWh/100 km]	[l/100 km]
[kWh/l]	[-]		
8.89	0.3	14.37	5.39
		24.41	9.15

Tabulka č. 12: Tabulka s vyčíslením odpovídající spotřeby benzínu u konvenčního vozidla



14. Závěr

Tato diplomová práce seznamuje čtenáře s problematikou návrhu silových komponent elektromobilu a jejich tvorbou v simulačním prostředí. V programu MATLAB/SIMULINK byl sestrojen zásobník elektrické energie pro vozidlo nezávislé trakce (elektromobilu), který využívá kombinaci elektrochemického akumulátoru a superkapacitoru. Dále byly sestrojeny měniče pro změny parametrů elektrické energie a pro pohon synchronního stroje s permanentními magnety, který byl také modelován. Další nezbytnou částí bylo sestrojení mechanického modelu elektromobilu, který se využil pro určování zátěžného momentu pohonné jednotky.

Bohužel se nepodařilo zrealizovat ověření výsledků laboratorně, díky absenci měniče pro PMSM v laboratoři VTP v Rostkách. Jeho dodání bohužel vyšlo až na dobu odevzdávání této diplomové práce.

Na základě celého simulovaného modelu je možné určit spotřebu elektromobilu při zadání rychlostního profilu a výškového profilu (profilu stoupání vozovky). Díky výsledkům simulací lze celý model optimalizovat pro konkrétní požadavky. Je možné měnit parametry mechanického modelu, PMSM, akumulátoru i superkapacitoru. Lze tak např. navrhnout vhodný akumulátor dle požadovaného dojezdu. S použitými parametry všech komponent vyšel dojezd modelovaného vozidla 324,4 km (maximální uložená energie v akumulátoru je 46,62 kWh a spotřeba dle NEDC je 14,37 kWh/100 km). Při spotřebě vozidla se neuvažovalo s podružnými spotřebiči jako světla, klimatizace či vytápění vozidla, což odpovídá metodice určování spotřeby reálných vozidel [16].

Celý model elektromobilu je velmi rozsáhlý a vyžaduje značné nároky na PC, na kterém je model počítán. Na HW hůře vybaveném PC je časová náročnost simulací značná, přestože je model optimalizován (největší možný krok výpočtů vzhledem k maximální přesnosti výpočtů).

Námětem pro rozšíření a pokračování v této práci by mohlo být například využití odbuzování PMSM a s tím spojené rozšířené řízení. V současném modelu celého elektromobilu se s odbuzováním nepočítalo, složka proudu i_d [A] je zde regulována na nulovou hodnotu.



Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Schéma vektorového řízení	10
Obrázek č. 2: Celkový model PMSM (MATLAB/SIMULINK)	11
Obrázek č. 3: Clarkové transformace (MATLAB/SIMULINK)	11
Obrázek č. 4: Zpětná transformace Clarkové (MATLAB/SIMULINK)	12
Obrázek č. 5: Parkova transformace (MATLAB/SIMULINK).....	13
Obrázek č. 6: Zpětná Parkova transformace (MATLAB/SIMULINK)	13
Obrázek č. 7: Výpočet proudů (MATLAB/SIMULINK)	16
Obrázek č. 8: Výpočet momentu a otáček (MATLAB/SIMULINK)	17
Obrázek č. 9: Celkový model PMSM (MATLAB/SIMULINK).....	17
Obrázek č. 10: Model vektorového řízení	18
Obrázek č. 11: Obrys čelní plochy vozidla	20
Obrázek č. 12: Určení úhlu stoupání	21
Obrázek č. 13: Mechanický model vozidla v MATLAB/SIMULINK	23
Obrázek č. 14: Zátěžný moment v závislosti na rychlosti a na sklonu vozidla	24
Obrázek č. 15: Výpočet úbytku kapacity CCF a $R_{c_{cycle}}$ článku akumulátoru v MATLAB/SIMULINK	28
Obrázek č. 16: Náhradní obvod pro výpočet impedance článku akumulátoru.....	28
Obrázek č. 17: Výpočet impedance článku akumulátoru v MATLAB/SIMULINK.....	29
Obrázek č. 18: Korekce napětí pro určení teplotní závislosti napětí článku akumulátoru.....	30
Obrázek č. 19: Výpočet teplotní závislosti korekčního členu napětí pro články akumulátoru v MATLAB/SIMULINK.....	31
Obrázek č. 20: Celkový model článku akumulátoru v MATLAB/SIMULINK	31
Obrázek č. 21: Vybíjecí charakteristika nového článku akumulátoru	32
Obrázek č. 22: Rozdíl mezi vnitřní strukturou běžného elektrolytického kondenzátoru (vlevo) a superkapacitoru (vpravo)	34
Obrázek č. 23: Reálné schéma zapojení aktivního balancéru	35
Obrázek č. 24: Dvojice aktivních balancérů na společné desce	36
Obrázek č. 25: Příklad reálné superkapacitorové baterie	36
Obrázek č. 26: Model superkapacitoru v MATLAB/SIMULINK	38
Obrázek č. 27: Nabíjecí/vybíjecí charakteristiky modelovaného superkapacitoru Maxwell BCAP3000	39
Obrázek č. 28: Schéma reálného boosteru	40
Obrázek č. 29: Silová část zvyšovacího/snižovacího DC/DC měniče v MATLAB/SIMULINK	40
Obrázek č. 30: Logika řízení DC/DC měniče včetně PWM subsystémů.....	41
Obrázek č. 31: Silová část střídače pro PMSM	42
Obrázek č. 32: PWM pro střídač PMSM	43
Obrázek č. 33: Ověření funkce střídače pro PMSM	44
Obrázek č. 34: Rychlostí profil - jízdní cyklus NEDC	45
Obrázek č. 35: Obecné blokové schéma silové části elektromobilu	46
Obrázek č. 36: Napěťový meziobvod v MATLAB/SIMULINK	47
Obrázek č. 37: Jednoduchá přepěťová ochrana napěťového meziobvodu – odporník pro maření nevyužitelné brzdné energie	47



- Obrázek č. 38: Proud tekoucí střídačem na DC straně při NEDC a 0° stoupání vozovky 48
Obrázek č. 39: Průběh napětí na akumulátorové baterii a její SOC při stoupání vozovky 0° 49
Obrázek č. 40: Průběh napětí na akumulátorové baterii a její SOC při stoupání vozovky 1,5° .. 50



Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Základní vlastnosti permanentních magnetů.....	9
Tabulka č. 2: Parametry simulovaného stroje PMSM	15
Tabulka č. 3: Závislost součinitele valivého odporu na typu vozovky	19
Tabulka č. 4: Příklady hodnot součinitelů odporu vzduchu pro různá vozidla.....	20
Tabulka č. 5: Mechanické parametry simulovaného elektromobilu	23
Tabulka č. 6: Koeficienty pro rovnice (31) a (37) závislé na aktuální teplotě akumulátorového článku	27
Tabulka č. 7: Maska subsystému "Battery_model" s parametry modelované akumulátorové baterie	33
Tabulka č. 8: Porovnání základních hodnot běžného elektrolytického kondenzátoru, superkapacitoru a olověného akumulátoru	37
Tabulka č. 9: Parametry superkapacitoru Maxwell BCAP3000	38
Tabulka č. 10: Popis dílčích jízdních cyklů NEDC	45
Tabulka č. 11: Tabulka s vyčíslením výsledné spotřeby elektromobilu a případné potenciálové energie, kterou vozidlo získalo stoupáním.....	50
Tabulka č. 12: Tabulka s vyčíslením odpovídající spotřeby benzínu u konvenčního vozidla	50



Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
B_r	Remanence	[T]
H_k	Koercitivní síla	[kA/m]
$(BH)_{max}$	Energetický součin	[kJ/m ³]
i_d, i_q	Proudy v d, q souřadném systému	[A]
w	Požadovaná veličina	[-]
y	Skutečná veličina	[-]
e	Regulační odchylka (chyba)	[-]
u	Akční veličina	[-]
G_r (s)	Přenos regulátoru	[-]
K_p	Zesílení proporcionální složky	[-]
T_i	Integrační konstanta	[-]
i_α, i_β	Proudy v α, β souřadném systému	[A]
i_a, i_b, i_c	Proudy v a, b, c souřadném systému	[A]
P	Jmenovitý výkon	[kW]
$M_{100\text{ }^\circ\text{C}}$	Trvalý moment (teplota vinutí 100 °C)	[Nm]
M_{max}	Maximální moment	[Nm]
2p, p_p	Počet pólpárů	[-]
J_{rot}, J	Moment setrvačnosti rotoru	[kg*m ²]
$R_{100\text{ }^\circ\text{C}}$	Elektrický odpor (teplota vinutí 100 °C)	[Ω]
L_d	Indukčnost v ose d	[mH]
L_q	Indukčnost v ose q	[mH]
ψ_m	Magnetický tok magnetů	[Wb]
l_{vz}	Vzduchová mezera	[mm]
$I_{100\text{ }^\circ\text{C}}$	Trvalý proud (teplota vinutí 100 °C)	[A]
n_{max}	Maximální doporučené otáčky	[ot*min ⁻¹]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
u_d, u_q	Napětí v d, q souřadném systému	[V]
R_s	Činný odpor statorového vinutí	[Ω]
ψ_d, ψ_q	Spřažené magnetické toky v d, q souřadném systému	[Wb]
ω_e	Elektrická úhlová rychlost	[rad/s]
ψ_m	Spřažený magnetický tok permanentních magnetů	[Wb]
L_d, L_q	Příčná, podélná indukčnost	[H]
ω_m	Mechanická úhlová rychlost	[rad/s]
m_i	Vnitřní moment stroje	[Nm]
m_z, M_m	Zátěžný moment	[Nm]
O_{val}	Valivý odpor	[N]
f_k	Součinitel valivého odporu	[-]
G	Tíha vozidla	[N]
α	Sklon vozovky	[°]



m_v	Celková hmotnost vozidla	[kg]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
O_{vzd}	Odpor vzduchu	[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, km/h]
O_s	Odpor stoupání	[N]
h	Výška nakloněné roviny	[m]
l	Délka nakloněné roviny	[m]
O_z	Odpor zrychlení	[N]
O_{zp}	Posuvná část odporu zrychlení	[N]
O_{zr}	Rotační část odporu zrychlení	[N]
a_x	Zrychlení vozidla	[m/s ²]
J_v	Moment setrvačnosti rotačních částí vozidla	[kg*m ²]
r_k	Poloměr pneumatik vozidla	[m]
m_r	Hmotnost rotačních částí vozidla	[kg]
N	Převodový poměr převodovky	[-]
F_{od}	Výsledná zátěžná síla	[N]
η	Účinnost převodovky	[-]
U_{bat}	Výstupní napětí akumulátorového článku	[V]
U_{oc}	Napětí naprázdno akumulátorového článku	[V]
i_{bat}	Proud protékající akumulátorovým článkem	[A]
Z_{eq}	Impedance akumulátorového článku	[Ω]
$\Delta E(T)$	Korekční člen napětí akumulátorového článku závislý na jeho teplotě	[V]
SOC (bat)	Úroveň nabití akumulátorového článku	[-]
SOC_{init}	Počáteční stav úrovně nabití akumulátorového článku	[-]
C_{usable}	Kapacita akumulátorového článku	[Ah]
CCF	Korekční člen pro definování úbytku kapacity akumulátorového článku	[-]
T	Termodynamická teplota	[K]
t (bat)	Čas skladování akumulátoru	[měsíc]
t	Čas	[s]
k_1	Koeficient pro změnu CCF související se změnami na záporné elektrodě	[cyklus ⁻²]
k_2	Koeficient pro změnu CCF související se změnami na záporné elektrodě	[cyklus ⁻¹]
k_3	Koeficient pro změnu R_{cycle}	[Ω /cyklus ^{1/2}]
R_{cycle}	Vnitřní odpor akumulátorového článku závislý na počtu vybíjecích cyklů	[Ω]
v_{bat}	Aktuální teplota akumulátorového článku (při činnosti)	[°C]
v_{str}	Skladovací teplota akumulátorového článku	[°C]



R_{ser}	Sériový odpor akumulátorového článku	[Ω]
R_{trns_S}, R_{trns_L}	Transientní odpory	[Ω]
C_{trns_S}, C_{trns_L}	Transientní kapacity	[F]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
ϵ_0	Permitivita vakua	[F/m]
ϵ_r	Poměrná permitivita	[-]
S	Aktivní plocha mezi deskami kondenzátoru	[m ²]
d	Vzdálenost elektrod kondenzátoru (tloušťka dielektrika)	[m]
C_{ser_celk}	Výsledná kapacita kondenzátorů řazených v sérii	[F]
n	Počet kondenzátorů v sérii	[-]
C_k	Kapacita k-tého kondenzátoru	[F]
Q	Elektrický náboj	[C]
U	Napětí	[V]
I, i	Proud	[A]
SOC (cap)	Úroveň nabití kondenzátoru	[-]
Q_{skut}	Aktuální elektrický náboj uložený v kondenzátoru	[C]
Q_{celk}	Velikost elektrického náboje, který je kondenzátor schopen pojmout	[C]
Q_{init}	Počáteční náboj uložený v kondenzátoru	[C]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
i_{sv}	Svodový proud	[A]
$I_{leakage_current}$	Svodový proud při jmenovitém napětí	[A]
U_{skut}	Okamžitá hodnota napětí	[V]
E_{aku}	Maximální energie uložená v akumulátorové baterii	[kWh]
C_{clanku}	Kapacita jednoho článku akumulátorové baterie	[Ah]
U_{n_clanku}	Jmenovité napětí jednoho článku akumulátorové baterie	[V]
p_p (bat)	Počet paralelně spojených větví	[-]
p_s (bat)	Počet článků v sérii (v jedné větvi)	[-]
E_{cap}	Maximální energie uložená v superkapacitorové baterii	[kWh]
C_{cl}	Kapacita jednoho superkapacitoru	[F]
U_{max}	Maximální napětí na jednom superkapacitoru	[V]
p_s (cap)	Počet superkapacitorů v sérii	[-]



Bibliografie – seznam použitých zdrojů informací

- [1] Pavelka a kol.: *Výkonová elektronika*, ČVUT 2009 Praha, ISBN: 978-80-01-03626-6
- [2] Pavelka Jiří: *Elektrické pohony*, ČVUT 2006 Praha, ISBN: 80-01-01411
- [3] Jacek F. Gieras: *Permanent magnet motor technology*, Third edition, USA 2010
- [4] J. R. Hendershot Jr., TJE Miller: *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Oxford 1994
- [5] MATLAB Primer COPYRIGHT 1984-2013 by The MathWorks, Inc., dostupné z:
http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf
- [6] Florence Meier: *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, dostupné z:
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:332/FULLTEXT01.pdf>
- [7] http://www.ijareeie.com/upload/january/19_Mathematical%20Modelling.pdf
- [8] Kryštof Špaček, Bakalářská práce: *Princip a použití prstencových motorů v průmyslových aplikacích*
- [9] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp2231.pdf>
- [10] <http://www.discovercircuits.com/DJ-Circuits/supcapvoltlim.htm>
- [11] http://i01.i.aliimg.com/wsphoto/v0/32310425683_1/2pcs-2-7V-to-5-4V-3000F-series-super-capacitor-plate-protection-board-balancing-boards.jpg
- [12] http://vehicle-electronics.biz/sites/default/files/field/image/kemet_0.jpg
- [13] <http://www.illinoiscapacitor.com/pdf/EDLC%20application%20guidelines.pdf>
- [14] <http://oze.tzb-info.cz/10362-naklady-na-akumulaci-elektřiny-v-sekundárních-clancích>
- [15] <https://www.circuitlab.com/circuit/j563rg/screenshot/540x405/>
- [16] http://old.kvm.tul.cz/studenti/texty/experiment_metody/In-TECH2_valce.pdf
- [17] http://portal.sda-cia.cz/clanky/download/TS_201111p03.pdf
- [18] http://vtb.engr.sc.edu/vtbwebsite/downloads/publications/lithiunionbattery_lius.pdf
- [19] http://www.etf.unssa.rs.ba/~slubura/diplomski_radovi/Završni_rad_MarkoSili/Literatura/modeli%20baterija%20IEEE/A%20dynamic%20lithium-ion%20battery%20model%20considering%20the%20effect%20of%20temperature%20and%20capacity%20fading.pdf
- [20] <https://www.powerstream.com/p/us18650vtc4.pdf>
- [21] <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/03-asx-aas-1321623157.pdf>