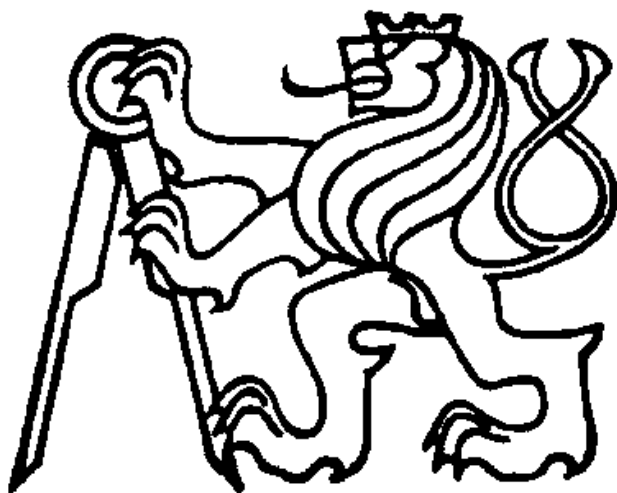


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**



**TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI**



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

**Ing. Milan Vacarda**

**MOŽNOSTI AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE  
V TRAKČNÍCH APLIKACÍCH**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, 8, 2015

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře elektrických pohonů a trakce Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Milan Vacarda  
Sobotecká 837  
511 01 Turnov

Školitel: Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc  
Katedra elektrických pohonů a trakce  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti: .....  
.....  
.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony v zasedací místnosti č ..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru  
Elektrické stroje přístroje a pohony  
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

## Obsah

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	1
Automobil s hybridním pohonem .....	1
Tematicky blízké technologie .....	1
Technologie využívající superkapacitor a DC/DC měnič .....	2
1. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	3
2. METODY ZPRACOVÁNÍ.....	4
Analýza obvodu rekuperačního měniče .....	4
Regulace rekuperačního měniče .....	5
Vytížení kapacity superkapacitoru.....	7
Úplné schéma regulace hybridního pohonu .....	9
3. VÝSLEDKY .....	12
Hardware.....	12
Software .....	13
Měření.....	14
4. ZÁVĚR.....	17
Seznam v tezích použité literatury .....	18
Seznam prací disertanta – ostatní.....	19
SUMMARY .....	20
RESUMÉ .....	21
Seznam použitých zkratk .....	22

## 1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Stěžejní pro řešení problematiky optimálního využití kapacity superkapacitoru v jízdním režimu je práce [1] Autor řeší problematiku nabíjení a vybíjení superkapacitoru. Soustředí se zejména na principy a funkčnost meziobvodu, rekuperačního měniče, tlumivky a supekacitoru. Návrh regulátoru rekuperačního měniče se nezabývá optimálním využitím superkapacitoru.

Článek [2] představuje typy hybridních pohonů a objasňuje princip experimentálního modelu kombinovaného hybridního pohonu na pracovišti elektrotechnické fakulty. Akumulací energie se nezabývá.

Článek [3] popisuje výkonovou bilanci a vysvětluje princip přenosu mechanického výkonu spalovacího motoru přes elektrický dělič výkonu meziobvodem do trakčního motoru. Nezabývá se elektrickým výkonem v meziobvodu a energií v akumulacním prvku.

Článek [4] se zabývá numerickým určením kapacity superkapacitoru podle náročnosti jízdního manévru a prezentuje experiment na fyzikálním modelu. Nezabývá se způsobem regulace energie v superkapacitoru v závislosti na jízdním režimu.

### **Automobil s hybridním pohonem**

*Volkswagen VW XL1, plug-in hybrid.* [5]

Vznětový dvouválec TDI / 0.8 litru / 35 kW / 120 Nm, elektromotor 20 kW / 100 Nm, akumulátor 5.5 kWh, hmotnost 795 kg.

Vozidlo nevyužívá superkapacitor.



Obr. 1 Plug-in hybrid Volkswagen VW XL1

### **Tematicky blízké technologie**

*Elektromobil Škoda Green E Line.*



Obr. 2 Zástavba modelu Škoda Octavia Green – E-Line [6]

Jízdní režimy jsou rozděleny na 3 stupně komfortu: comfort, normal a range – rozšířený dojezd, [6].

Decelerační režim je rozdělen na dva režimy: Plachtění (klouzání), kdy je brzdňný moment motoru redukován na minimum. A rekuperace se 3 stupni brzdňného momentu. V tomto režimu může být velikost rekuperace i brzdňného momentu nastavena voličem na multifunkčním volantu.

### Technologie využívající superkapacitor a DC/DC měnič

#### *Mazda i-ELOOP*

Energie decelerace a brzdění je alternátorem ukládána do superkapacitoru a DC/DC měničem do akumulátoru.

Jedná se o jednosměrný tok energie, vozidlo není HEV. [7]



Obr. 3 Mazda i-ELOOP. [7]

Nebylo nalezeno stejné nebo podobné technické zařízení nebo princip odpovídající fyzikálnímu modelu na experimentálním pracovišti fakulty, který je předmětem disertační práce.

## 1. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je analyzovat funkcionalitu fyzikálního modelu hybridního pohonu a princip funkce všech částí modelu ve vztahu k rekuperačnímu měniči.

Dále je cílem analyzovat rekuperační obvod z pohledu stability a regulovatelnosti. Přičemž výstupy analýzy jsou vstupy pro parametrizaci a kvalitu regulace.

Cílen je navrhnout řídicí systém rekuperačního měniče se základním procesem regulace s odpovídající dynamikou v rozsahu instalovaných výkonů motorů fyzikálního modelu hybridního pohonu při maximálním využití parametrů spínače, induktoru a superkapacitoru měniče.

Dále je cílem navrhnout metodu optimálního využití kapacity superkapacitoru hybridního pohonu v závislosti na jízdním režimu osobních vozidel pro nezávislou trakci. S tím souvisí analýza toku energie v hybridním pohonu s analýzou jízdního režimu.

Pro uvedené funkce je nutné navrhnout robustní a stabilní regulační softwarový algoritmus.

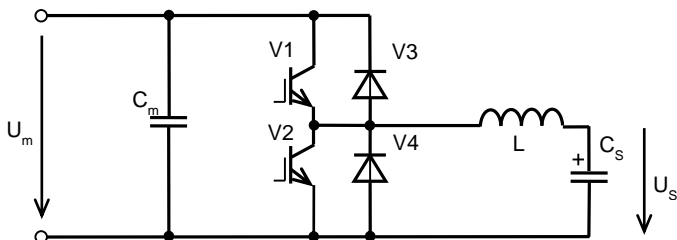
Dále se práce soustředí na zvýšení účinnosti snížením ztrát na sériových odporech induktoru a superkapacitoru návrhem induktoru s feromagnetickým jádrem a návrhem paralelního uspořádání superkapacitorů a návrhem RCD odlehčovacího členu pro snížení vlivu spínacích ztrát.



## 2. METODY ZPRACOVÁNÍ

### Analýza obvodu rekuperačního měniče

Úkolem rekuperačního měniče je přenášet přebytek energie z meziobvodu měničů elektrického děliče výkonu a trakčního motoru do akumulátoru – superkapacitoru. A v případě nedostatku energie v meziobvodu, přenášet akumulovanou energii ze superkapacitoru.



Obr. 4 Obvod rekuperačního měniče

Obecně lze každý dynamický systém, tedy i řízený, považovat za soustavu obvodů, kterou je možné popsat vnitřními (stavovými) veličinami a vnějšími vstupními a výstupními signály, které jsou funkcemi veličin.

I soustavu rekuperačního obvodu, Obr. 4 lze charakterizovat jako nelineární aktivní neautonomní soustavu. Soustavu je možné nahradit aktivním dvojbranem a lze předpokládat, že výstupní veličina (signál) je vytvořena superpozicí jedné nebo několika složek. Tyto složky jsou funkcí času  $f(t)$  a je možné je označit podle typu:

Stejnosměrná složka

$$f(t) = k \tag{1}$$

Periodická složka

$$f(t + T) = f(t) \tag{2}$$

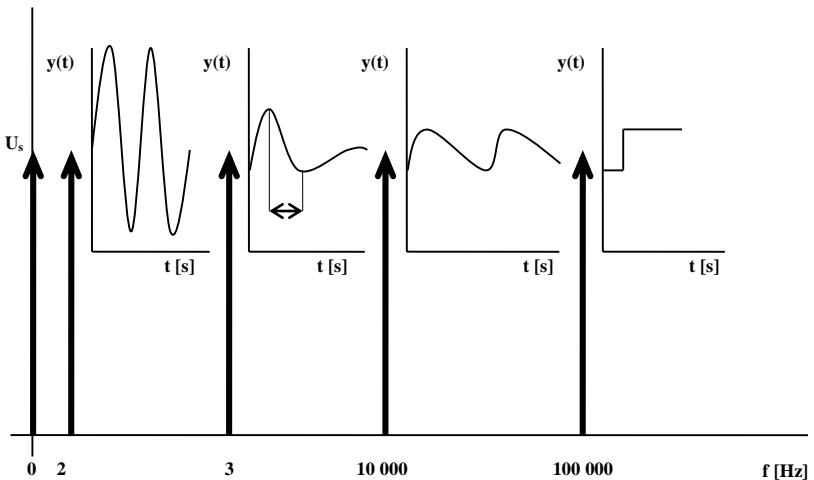
Přechodná složka

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0 \tag{3}$$

Po linearizaci je možné v soustavě využít princip superpozice. To umožňuje postupně vyšetřovat soustavu buzenou vždy jedním signálem.

Významné budící signály působící na soustavu – obvod rekuperačního měniče, Obr. 4, jsou na Obr. 5:

- Neperiodické buzení obvodu – Soustava se stejnosměrným buzením.
- Perioda vlastní kmitočtu soustavy vznikajícího při změně přenášeného výkonu – Soustava s harmonickým buzením vlastními kmitů soustavy.
- Přechnodný děj tlumeného kmitavého periodického signálu regulačního pochodu regulátoru – Soustava s harmonickým buzením tlumeným kmitem.
- Periodické PWM buzení obvodu – Soustava s periodickým buzením v ustáleném stavu, kdy v soustavě existuje složka periodicky zvlněného signálu.
- Perioda regulačního zásahu (softwarová smyčka) reakční doby regulačního obvodu – Soustava s impulzním buzením, kdy v soustavě existuje složka signálu s periodicky se opakujícím jednotkovým skokem.



Obr. 5 Složky signálu soustavy v kmitočtové oblasti

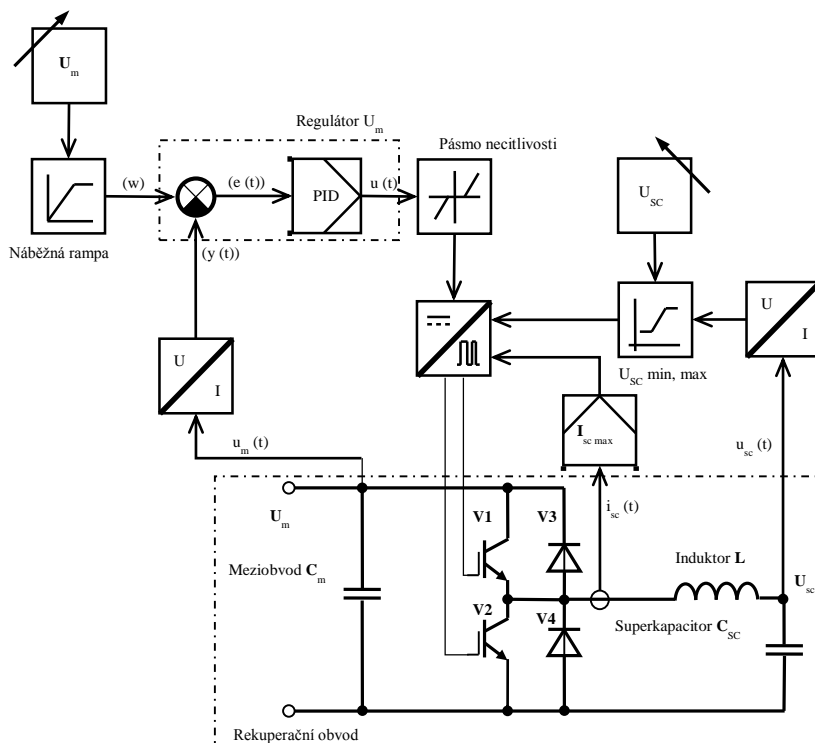
### Regulace rekuperačního měniče

Regulační obvod rekuperačního měniče na Obr. 6 je sestavený na základě závěrů analýzy rekuperačního obvodu a na základě syntézy regulátoru.

Z důvodu konečné tvrdosti zdrojů připojených v meziobvodu, je kolísání napětí  $u_m$  projevem změny stavu energie v meziobvodu. Soustava je regulována na nastavenou žádanou hodnotu ( $w$ ) napětí meziobvodu  $U_m$  (set point). Regulovaná veličina ( $y(t)$ ) je okamžitá hodnota napětí meziobvodu  $u_m(t)$  (process variable). Rozdílem těchto hodnot je regulační odchylka  $e(t) = U_m - u_m(t)$ . Při napětí  $u_m$  větším než  $U_m$ , je regulován tok energie do superkapacitoru. Při napětí  $u_m$  menším než  $U_m$ , je regulován tok energie ze superkapacitoru do meziobvodu.

Pozn.: znaménko regulační odchylky  $\pm e$  je parametrem pro řízení směru toku energie. Hodnota regulační odchylky je parametrem pro řízení výkonu.

Regulace na nastavenou žádanou hodnotu  $U_m$  je v principu zatěžování resp. odlehčování zdroje meziobvodu proudem do resp. ze superkapacitoru.



Obr. 6 Regulace rekuperačního měniče

$U_m$

žádaná hodnota stejnosměrného napětí meziobvodu

$u_m(t)$	okamžitá hodnota napětí meziobvodu, regulovaná veličina
$U_{sc}$	žádaná hodnota napětí superkapacitoru
$U_{sc\ max}/2$	stanovená minimální hodnota napětí superkapacitoru
$u_{sc}(t)$	regulovaná veličina, okamžitá hodnota napětí superkapacitoru
$e(t)$	regulační odchylka
$u(t)$	akční veličina
$i_{sc}(t)$	okamžitá hodnota proudu superkapacitorem

## Vytížení kapacity superkapacitoru

Ovládání pedálu akcelerace nebo brzdy (rekuperace) je ovládáním výkonu pohonu vozidla. Průběh okamžitého výkonu pohonu je obrazem jízdního profilu. Zpětnovazebním regulátorem je v tomto případě řidič. Jízdní profil, v rámci stanoveného komunikačního prostoru, je tedy určen rozhodováním řidiče.

Rozhodnutí řidiče je náhodný jev, jehož realizací je hodnota okamžitého výkonu pohonu. Výkon je v akumulačním prvku s časem transformován na energii. Obrazem energie v superkapacitoru je velikost náboje.

Schéma regulace je na Obr. 8, kde regulovanou veličinou je hodnota náboje v superkapacitoru, neboli napětí  $u_{sc}$  a regulační veličinou jsou otáčky spalovacího motoru. Žádanou hodnotou je statistická střední hodnota náboje  $Q_{sc}$ .

Rozdělení s jakou četností bude náboj superkapacitoru nabývat konkrétních hodnot je neznámé.

Definiční obor rozdělení je redukován na stanovený interval  $\langle Q_{\max}/2, Q_{\max} \rangle$ .  $Q = CU$ . (Vytěžování kapacity pod  $Q_{\max}/2$  snižuje účinnost přenosu energie. Pro udržení výkonu se zvyšuje proud, a tím úbytek na sériovém náhradním odporu superkapacitoru  $R_{ESR}$ .) Při instalované kapacitě superkapacitoru 100 F a maximálním napětí 56 V, je interval hodnot náboje  $\langle Q_{\max}/2 = 2800\text{ C}, Q_{\max} = 5600\text{ C} \rangle$ .

Lze předpokládat, že hodnoty s nejvyšší hustotou výskytu – hustotou pravděpodobnosti, budou uprostřed tohoto intervalu, tj.  $Q_{stř.} = 4200\text{ C}$ .

**Potom je možné rozdělení pravděpodobnosti hodnot náboje na stanoveném intervalu aproximovat tzv. normálním rozdělením.**

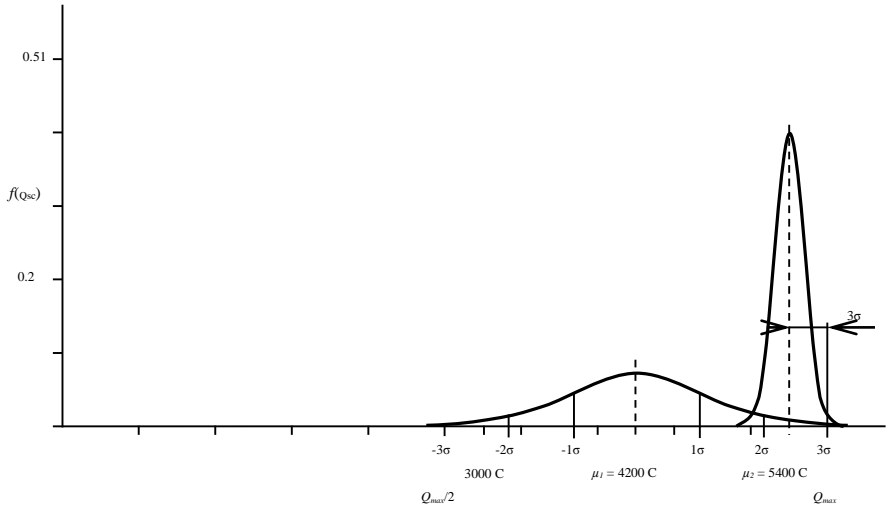
Rozdělení spojitě náhodné veličiny nelze popsat pravděpodobnostní funkcí v určitém bodě.

Rozdělení pravděpodobnosti je definováno funkcí označovanou jako hustota rozdělení pravděpodobnosti – hustota pravděpodobnosti (PDF – Probability Density Function) [8].

Normální rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny  $X$  s parametry  $\mu$  a  $\sigma^2$ ,  $N(\mu, \sigma^2)$ , pro  $-\infty < \mu < +\infty$ ,  $\sigma^2 > 0$  je pro  $-\infty < x < +\infty$  definováno hustotou pravděpodobnosti ve tvaru Gaussovy funkce, viz Obr. 7.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

$\mu$  střední hodnota  
 $\sigma^2$  rozptyl



Obr. 7 Hustota pravděpodobnosti náboje superkapacitoru

Výpočtem rovnice (4) s hodnotami ze stanoveného intervalu náboje (definičního oboru  $\langle Q_{max}/2, Q_{max} \rangle$ ,  $C = 100$  F,  $U_{max} = 56$  V) je na Obr. 7 křivka hustoty pravděpodobnosti se střední hodnotou  $\mu_1 = 4200$  C a s rozptylem v celém stanoveném intervalu. Křivka je obrazem dynamické jízdy, kdy se zvyšuje pravděpodobnost vybití superkapacitoru až ke stanovené dolní hranici náboje a je nutné zvyšovat výkon spalovacího motoru.

Křivka hustoty pravděpodobnosti např. se střední hodnotou  $\mu_2 = 5400$  C a malým rozptylem  $\sigma_2^2$  je obrazem úsporné jízdy s velkou mírou rekuperace,

při které se zvyšuje pravděpodobnost přebití superkapacitoru a výkon spalovacího motoru je nutné snižovat.

Poloha střední hodnoty  $\mu_2$  druhé křivky je stanovena podle pravidla šesti sigma, které říká, že téměř všechny hodnoty (99.7 %) normálního náhodné veličiny  $X$  normálního rozdělení o parametrech  $\mu$  a  $\sigma^2$  leží v intervalu  $(\mu \pm 3\sigma)$ , tj.  $6\sigma$ . Z toho plyne, že jen ve 3 případech z 1000, tj. s pravděpodobností 0.3 %, nastanou významné okrajové stavy: nedostatku energie nebo přebití. Příklad nedostatku energie překročení dolní stanovené hranice s pravděpodobností 0.3 % není závažný. V případě přebití znamená překročení horní hranice náboje i s pravděpodobností 0.3 % překročení nominálního napětí superkapacitoru.

**Proto maximální hodnota regulované veličiny – střední hodnoty náboje  $Q_{Sc}$ , musí být vzdálena nejméně  $3\sigma$  od  $Q_{Scmax.}$ , viz 2. křivka na obrázku.**

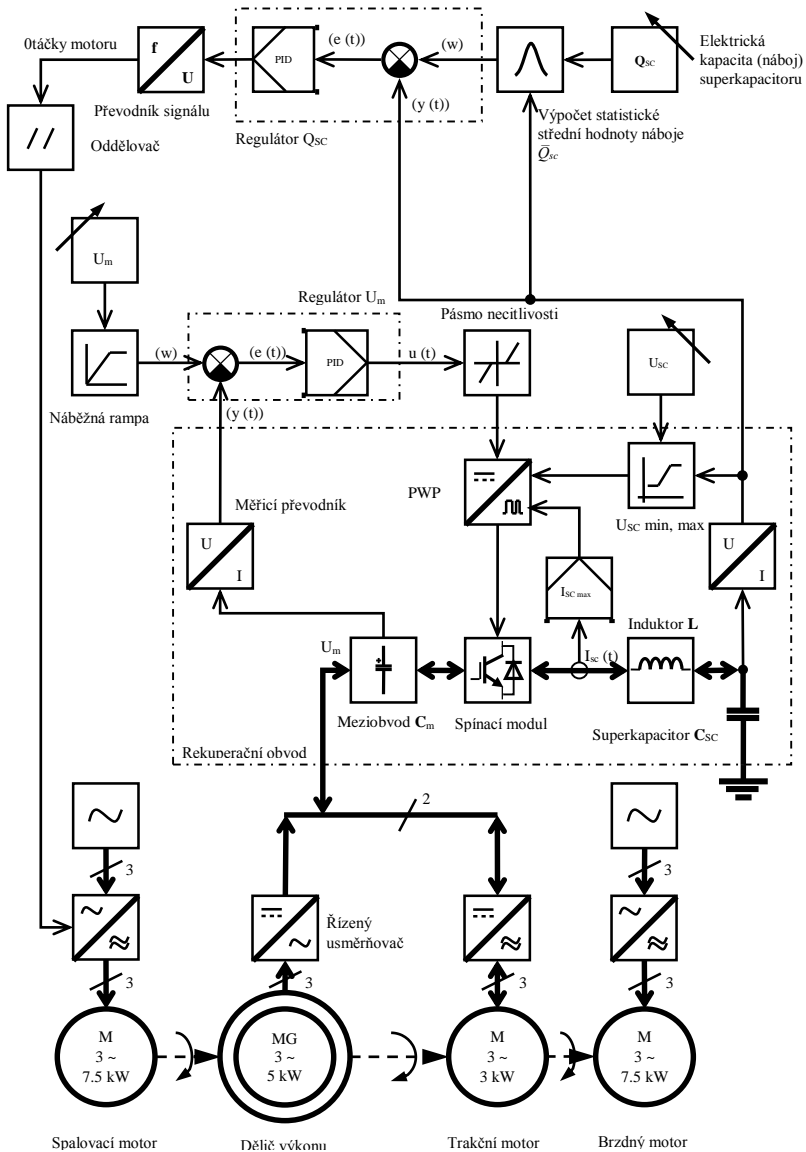
Pravidlo platí obdobně i pro dolní stanovenou hranici.

### Úplné schéma regulace hybridního pohonu

Na Obr. 8 je úplné schéma regulace hybridního pohonu. V hierarchii nižší regulační obvod je regulace rekuperačního měniče. Rekuperační měnič je řízen tak, aby udržoval hodnotou napětí v meziobvodu tím, že mění tvrdost zdroje meziobvodu zatížením, tj. proudem do superkapacitoru nebo odlehčením, tj. zvýšením tvrdosti meziobvodu proudem ze superkapacitoru. PID regulátoru  $U_m$  reguluje regulovanou veličinu, tj. napětí meziobvodu  $u_m$  k nastavené žádané hodnotě  $U_m$ . Regulační veličina na výstupu z regulátoru je PWM signál budící výkonový spínací modul. V případě záporné regulační odchylky, tj. napětí meziobvodu je větší než nastavená požadovaná hodnota, je regulováno nabíjení superkapacitoru. V případě kladné regulační odchylky, tj. napětí meziobvodu je menší než nastavená požadovaná hodnota, je regulováno vybíjení. V případě překročení nastaveného proudu obvodem superkapacitoru, je aktivován proudový omezovač  $I_{SCmax.}$ . V případě dosažení některé z nastavených limit napětí superkapacitoru je aktivován napěťový omezovač  $U_{SCmin., max.}$ . Proudové  $i_{sc}$  a napěťové  $u_m$  a  $u_{sc}$  měřicí sondy jsou převodníky proud/napětí. Náběžná rampa žádané hodnoty  $U_m$  zajišťuje po zapnutí řízené nabíjení vybitého superkapacitoru. Nelinearita, pásmo necitlivosti, vložená do regulačního obvodu, potlačuje kmitavé přepínání mezi nabíjením a vybíjením v okolí nulové regulační odchylky.

Hierarchicky vyšší regulační obvod je regulace výkonu pohonu. PID regulátoru  $Q_{Sc}$  reguluje regulovanou veličinu, tj. náboj resp. napětí superkapacitoru k vlečené žádané hodnotě. Tou je statistická střední hodnota

náboje resp. statistická střední hodnota napětí superkapacitoru. Regulační veličinou na výstupu regulátoru jsou otáčky spalovacího motoru. Vzdálené ovládání otáček měniče spalovacího motoru vyžaduje s ohledem na přítomnost rušení převodník signálu napětí/frekvence a oddělení obvodů.



Obr. 8 Úplné schéma regulace hybridního pohonu



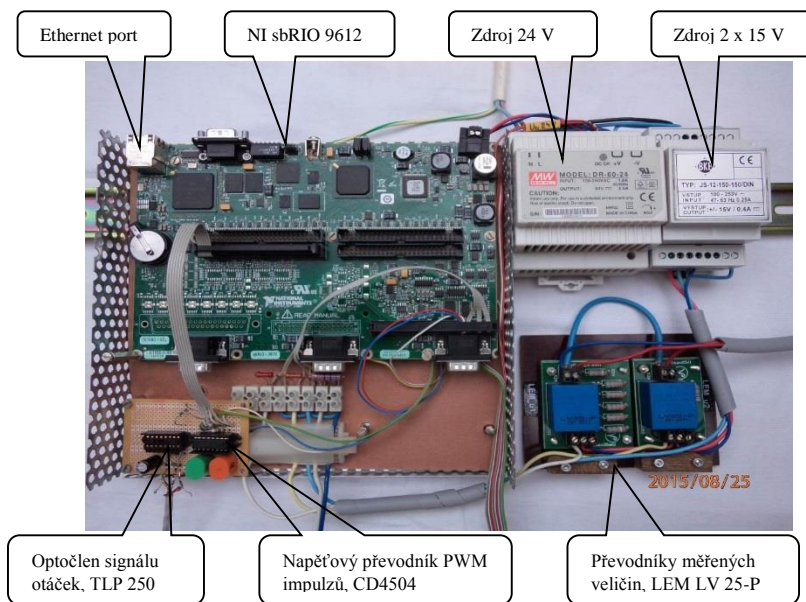
### 3. VÝSLEDKY

#### Řídicí systém, kontrolér

V řídicím systému rekuperačního měniče jsou soustředěny funkce řízení výkonu hybridního pohonu, řízení otáček spalovacího motoru a řízení rekuperačního měniče.

#### Hardware

Základem hardware je jednodeskový kontrolér National Instruments NI sbRIO 9612. Ten přímo řídí výkonový spínací modul Semikron. Kontrolér i budicí blok spínacího modulu jsou napájeny stabilizovaným zdrojem 24 V/60 W. Vstupní měřené veličiny jsou z důvodu rušení snímány proudově napěťovými převodníky LEM. Ty jsou napájeny symetrickým stabilizovaným zdrojem 2 x 15 V/12 W. Řídicí PWM impulzy z kontroléru jsou přivedeny přes napěťový převodník do budicího bloku spínacího modulu. Signál otáček je z důvodu rušení v kontroléru softwarově převeden frekvenční modulací na frekvenční signál. Ten je přes oddělovací optočlen přiveden na otáčkový vstup měniče spalovacího motoru. Programování, ovládání, monitorování i diagnostika se uskutečňuje přes ethernet sériové rozhraní kontroléru kabelem TCP/IP.

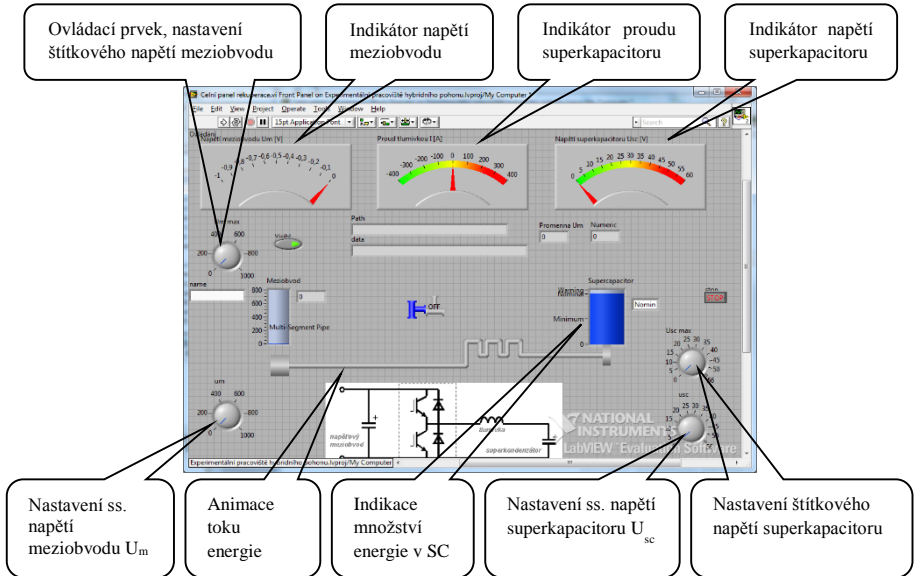


Obr. 9 Hardware řídicího systému hybridního pohonu

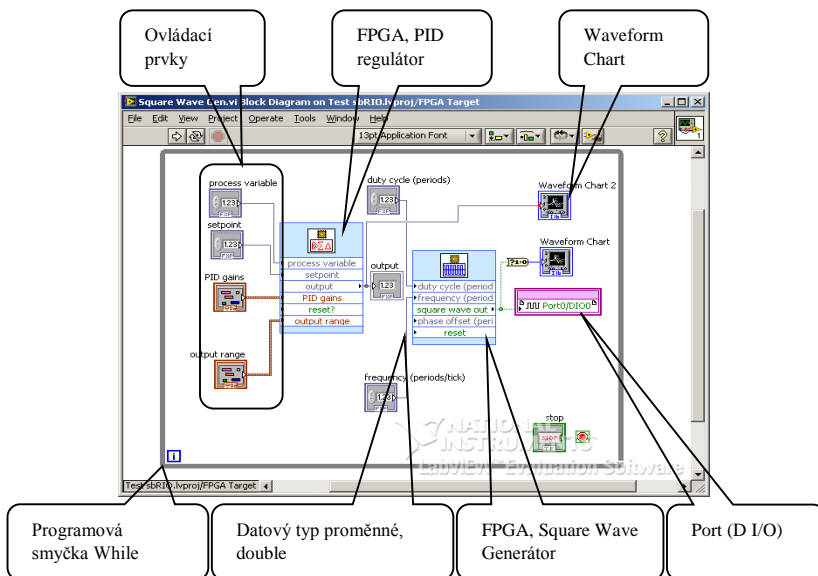
## Software

### Řízení hybridního pohonu

Zdrojový kód LabVIEW (LV) modulu řízení a ovládání rekuperačního měniče a hybridního pohonu je interpretován ovládacím panelem a blokovým schématem na následujících obrázcích.



Obr. 10 Čelní panel, ovládací hybridního pohonu



Obr. 11 Blokové schéma, zdrojový kód, část regulace rekuperačního měniče

Na Obr. 11 je blokové schéma části kódu řízení hybridního pohonu. Blokové schéma implementuje úplné schéma regulace hybridního pohonu, Obr. 8.

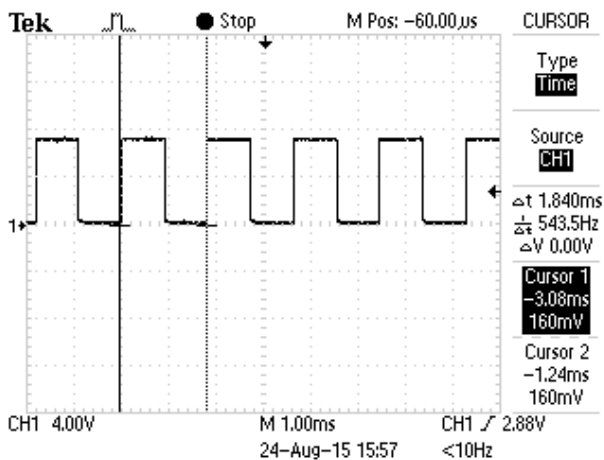
Konfigurace FPGA Square Wave Generatoru: Frequency 10 kHz, Output data type Boolean a FPGA clock rate 40 MHz.

Konfigurace FPGA PID regulátoru implementuje závěry a parametry v kapitole Syntéza regulátoru disertační práce: Proportional gain  $K_c = 0.5$ , Integral time  $T_i = 1.5$ , Derivative time  $T_d = 0.4$  a Sampling Time  $T_s = 2$  s,

V další části blokového schématu jsou implementovány závěry z kapitoly Syntéza regulačního procesu hybridního pohonu disertační práce. Matematické operace jsou implementovány funkcemi Mean a Variance.

## Měření

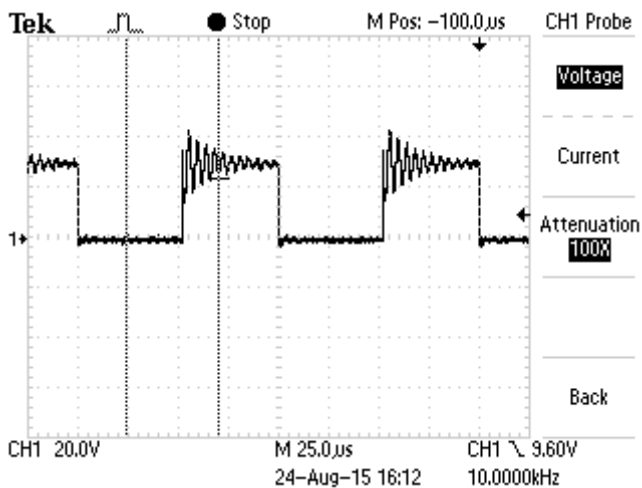
Průběh signálu otáček spalovacího motoru sejmutý v místě převodníku U/f, Obr. 8. Průběh odpovídá parametrům.



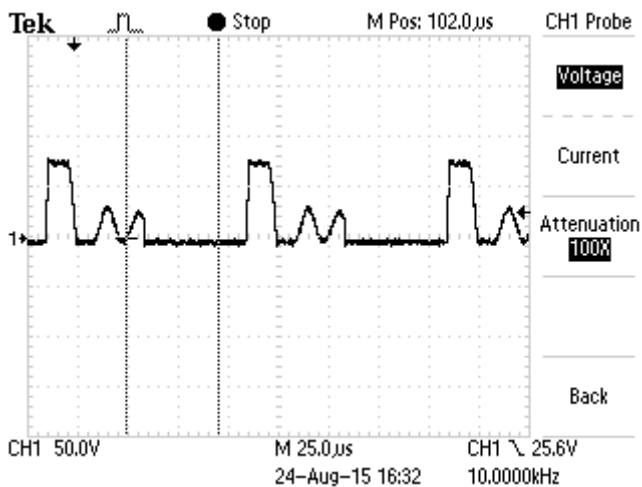
Obr. 12 Signál otáček spalovacího motoru převodníku  $U/f$ ,  $f = 543$  Hz

### Napěťové průběhy na výkonovém spínacím modulu rekuperačního měniče

Napěťové průběhy jsou sejmuté ve středním uzlu tranzistorů, diod a tlumivky spínacího modulu rekuperačního měniče, Obr. 4. Průběhy odpovídají parametrům. PWM kmitočet je 10 kHz. V průbězích jsou viditelné harmonické tlumené kmity po vypnutí tranzistoru. Příčinou jsou parazitní indukčnosti a kapacity ve struktuře výkonového spínacího modulu. Výkonový modul nemá RCD odlehčovací obvod.



Obr. 13 Spínací impulzy tranzistoru V1, PWM 50 %



Obr. 14 Spínací impulzy tranzistoru V2, PWM 50 %

## 4. ZÁVĚR

Snaha autora byla každé tvrzení a myšlenku podpořit matematickou analýzou a výpočty.

Byla provedena poměrně rozsáhlá analýza rekuperačního obvodu a v každé kapitole byl učiněn závěr.

Byla vytvořena vlastní metoda vytížení superkapacitoru podpořena analýzou a výpočty založená v podstatě na plovoucích vzájemně vázaných a ovlivňujících se regulacích rekuperačního měniče a spalovacího motoru. Tím je možné bez externích technických prostředků realizovat autonomní řízení hybridního pohonu nezávislé na jízdních režimech.

Zvýšení účinnosti obvodu je možné dosáhnout snížením sériových odporů indukčnosti a superkapacitoru. Snížení celkových odporů 2x až 4x je možné dosáhnout pouze modifikací prvků.

Řídicí systém je jednodeskový kontrolér s poměrně rozsáhlými periferiemi, do kterého se podařilo implementovat řízení rekuperačního měniče i řízení hybridního pohonu.

Využití možností programového prostředí dovoluje modifikovat parametry softwarových modulů ovládání a řízení pro konkrétní součástky a experimenty.

## Seznam v tezích použité literatury

1. **Pavelka, Vladek.** *Rekuperační systém se superkondenzátorem pro hybridní pohon.* Praha : ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2006. str. 80, Doktorská disertace.
2. **Zdeněk Čerovský, Petr Hanuš, Zdeněk Halámka, Pavel Mindl, Vladek Pavelka.** ČVUT FS. *Experimentální pracoviště hybridního pohonu.* [Online] [Citace: 1. 8. 2015.] <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-elen.pdf>.
3. ČVUT FS. *Trakční charakteristiky střídavého elektromechanického přenosu výkonu s elektrickým děličem výkonu.* [Online] [Citace: 1. 8. 2015.] <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-obden-cer.pdf>.
4. **Mindl, Pavel.** *Superkapacitor pro hybridní pohon vozidla.* [Online] [Citace: 1. 8. 2015.] [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap5\\_Plzen.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap5_Plzen.pdf).
5. **XL 1. Volkswagen.** [Online] [Citace: 1. 8. 2015.] <http://www.volkswagen.co.uk/about-us/futures/xl1>.
6. **Marek Jež.** Škoda Octavia Green-E-Line. [Online] 2012. [Citace: 25. 10 2012.] Prezentace. [http://k616.fd.cvut.cz/vyuka/mgr/16PDP/prednasky/07c\\_Skoda\\_Octavia\\_Green\\_e\\_line\\_Jez\\_120418.pdf](http://k616.fd.cvut.cz/vyuka/mgr/16PDP/prednasky/07c_Skoda_Octavia_Green_e_line_Jez_120418.pdf).
7. **Mazda.** Environmental Technology. *i-ELOOP.* [Online] [Citace: 1. 8. 2015.] <http://www2.mazda.com/en/technology/env/i-eloop/>.
8. **Rogalewicz, Vladimír.** *Pravděpodobnost a statistika pro inženýry.* Praha : ČVUT, 1998. str. 178. ISBN 80-01-01740-0.

## Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

### *Publikace v impaktovaných časopisech*

---

### *Publikace v recenzovaných časopisech*

1. **Vacarda, Milan.** Optimální využití kapacity superkapacitoru v hybridním pohonu. *Automa – časopis pro automatizační techniku*, s. r. o. 2015, přijato k tisku. 100 %
2. **WORKSHOP 2011. Mašek, Petr, Jukl, Tomáš a Vacarda, Milan.** Praha: Czech Technical University in Prague, 2011. Development and Modernization of Power Converters for Experimental Workplace. 33 %

### *Patenty*

---

## Seznam prací disertanta – ostatní

### *Publikace v impaktovaných časopisech*

---

### *Publikace v recenzovaných časopisech*

3. **Vacarda, Milan.** Detekce jasových změn v obrazu pomocí lokálních spektrálních hustot energie. *Automatizace*. 12, 2007. s. 772-775. 100 %

### *Patenty*

4. —. *Impulzně regulovaný zdroj s převodním transformátorem*. 259179 ČSSR, 15. 2 1988. Vynález. 100 %

## Ohlasy

Bez ohlasů a recenzí



## SUMMARY

Dissertation focuses on the study of the management of hybrid propulsion for cars with a view to optimizing the use of on-board energy sources.

The goal is to design a control system regenerative converters for managing energy flows Super capacitor (Control the Flow of Energy).

A draft methods for optimal capacity utilization super capacitor of hybrid propulsion, depending on the driving mode of passenger vehicles independent traction (Energy Management). A related analysis of energy flows in hybrid propulsion and driving mode analyzing.

The first part is regenerative converter circuit theoretically analyzed and made linearized mathematical model decomposed into separate systems with a different signals. In a DC system, the issues of concentration and hardness sources of electrical power dividers and super-capacitors and the result of the analysis is to determine the process variable, the DC link voltage  $U_m$ . In a system with periodic PWM signal is given analytic solutions during of the super capacitor charging. In a system with harmonic damped oscillation is demonstrated in a mathematical model of the stability of regenerative circuit system. Chapter builds on the results of the synthesis process control system and parametric optimization of control and quality control process.

In the hybrid control strategy is derived by analyzing the driving profile of the controlled variable, ie. a state of energy in super capacitor (SOE - State of Energy), or the state of charge respectively state of voltage. State of charge of super capacitor is a random variable described by a probability density function. The control process is the charge of an internal combustion engine, respectively super capacitor voltage is regulated to a desired median charge.

Increasing the efficiency of regenerative converter circuit can be achieved by minimizing losses in the inductor series resistances and super capacitor. It is designed inductor with a ferromagnetic core and approximately 2 times smaller than the series resistance of the coil is current. It is designed to parallel arrangement of super capacitors way diminishing spare series resistance and voltage retaining capacity and a super capacitor.

To reduce the effect of switching energy losses is designed RCD reliever circuit switching module.

In the experimental part is formed by a control system consisting of controller, sensors and peripherals. The software is created by the graphical programming LabVIEW and consists of the management of the hybrid drive, which includes the control of regenerative converters and supporting modules control, setting and monitoring of controller sbRIO. The functionality of the control system with inverter is verified and debug on experimental workplace hybrid drive.

To achieve results were used in theoretical, analytical, research, development and experimental methods of work.

## RESUMÉ

Dizertační práce je zaměřena na studium řízení hybridního pohonu pro osobní automobily s ohledem na optimalizaci využití palubních energetických zdrojů.

Cílem je návrh řídicího systému rekuperačního měniče pro řízení toku energie superkapacitorem (Control the Flow of Energy).

A návrh metody optimálního využití kapacity superkapacitoru hybridního pohonu v závislosti na jízdním režimu osobních vozidel pro nezávislou trakci (Energy management). S tím souvisí analýza toku energie v hybridním pohonu a analýza jízdního režimu.

V první části je rekuperační obvod měniče teoreticky analyzován a vytvořen linearizovaný matematický model rozložený na samostatné soustavy s jednotlivými signály. Ve stejnosměrné soustavě je řešena problematika spojení a tvrdosti zdrojů elektrického děliče výkonu a superkapacitoru a výsledkem rozboru je stanovení regulované veličiny, napětí meziobvodu  $U_m$ . V soustavě s periodickým PWM signálem je podáno analytické řešení průběhu nabíjecího proudu superkapacitoru. V soustavě s harmonickým tlumeným kmitem je v matematickém modelu prokázána stabilita soustavy rekuperačního obvodu. Na výsledky kapitoly navazuje syntéza regulačního procesu soustavy a parametrická optimalizace regulátoru a kvality regulačního pochodu.

Ve strategii regulace hybridního pohonu je analýzou jízdního profilu odvozena regulovaná proměnná, tj. stav energie v superkapacitoru (SOE – State of Energy), neboli stav náboje resp. stav napětí. Stav náboje superkapacitoru je náhodná veličina popsaná funkcí hustoty pravděpodobnosti. V regulačním procesu spalovacího motoru je náboj resp. napětí superkapacitoru regulováno k žádané střední hodnotě náboje.

Zvýšení účinnosti obvodu rekuperačního měniče může být dosaženo minimalizováním ztrát na sériových odporech induktoru a superkapacitoru. Je navržen induktor s feromagnetickým jádrem a přibližně 2x menším sériovým odporem cívky než má stávající. Je navržen paralelní způsob uspořádání superkapacitorů snižující náhradní sériový odpor a zachovávající kapacitu a napětí superkapacitoru.

Pro snížení účinku energie spínacích ztrát je navržen RCD odlehčovací obvod spínacího modulu.

V experimentální části je vytvořen řídicí systém skládající se z kontroléru, sond a periférií. Software je vytvořen grafickým programovacím nástrojem LabVIEW a skládá se z modulu řízení hybridního pohonu, který zahrnuje i řízení rekuperačního měniče a podpůrných modulů řízení, nastavení a monitorování kontroléru sbRIO. Funkčnost řídicího systému s měničem je ověřována a odladěna na experimentálním pracovišti hybridního pohonu.

Pro dosažení výsledků byly využívány teoretické, analytické, výzkumné, vývojové a experimentální metody práce.

## Seznam použitých zkratek

### F

FPGA – Field-Programmable Gate  
Array.....14

### P

PDF – Probability Density Function.....8

PID – Proportional-Integral-Derivate  
Controller.....9, 14

PWM – Pulse Width Modulation.....5, 9,  
12, 15

### S

SOE – State of Energy.....21

### T

$T_s$  –Sampling Time, PID LabVIEW.....14