



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

System akumulace elektrické energie pro elektrické pohony

Autor práce: Tomáš György

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš GYÖRGY**
Osobní číslo: **E10B0209P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Systém akumulace elektrické energie pro elektrické pohony**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte stručný přehled možností akumulace elektrické energie pro použití v elektrických pohonech.
2. Sestavte obvodové schéma (měnič, zdroj energie, akumulátor energie atd.).
3. Proveďte simulaci pomocí prostředí Matlab (Simulink, Plecs).
4. Připravte algoritmy řízení pro implementaci do procesorového řízení (podklady pro programátora).

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

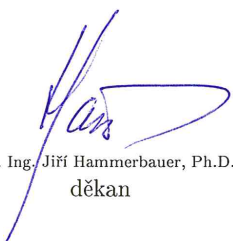
Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím systémů akumulace energie. Práce obsahuje přehled elektrických akumulátorů, jejich strukturu, parametry a nejčastější využití. Dále obsahuje stručný popis funkce setrvačnicku a podrobný popis superkapacitoru. V další části práce je detailně vysvětleno chování pulsního měniče napětí. Další kapitola obsahuje simulaci jízdy tramvaje s využitím superkapacitorů v prostředí Matlab (Simulink/Placs), ze které jsou zřejmé výhody zapojení se superkapacitory. Z této simulace je vytvořen vývojový diagram pro implementaci do procesorového řízení.

Klíčová slova

akumulace, elektrická energie, zdroj, pohon, výkon, regulace

Abstract

György, Tomáš. *Energy storage system for electric drives [Systém akumulace elektrické energie pro elektrické pohony]*. Pilsen, 2015. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Pavel Drábek

This bachelor's thesis deals with the use of energy accumulation systems. The thesis contains overview of electric accumulators and their structure, parameters and the most frequent utilization. Further it contains brief description of flywheel function and detailed description of a supercapacitor. In the next part of the thesis there is described principle of switching voltage converter. Next chapter is involved in a simulation of a tram using supercapacitors in Matlab environment (Simulink/Plecs). A flow chart for implementation in processor control is created from this simulation.

Keywords

accumulation, electrical energy, source, drive, performance, regulation

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 12. června 2015

Tomáš György

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
1 Úvod	1
2 Akumulátor	2
2.1 Rozdělení akumulátorů	2
2.2 Akumulátor olověný otevřený	4
2.3 Akumulátor olověný uzavřený	5
2.4 Akumulátor nikl-kadmiový	5
2.5 Akumulátor nikl-metalhydridový	6
2.6 Lithium-iontový akumulátor	7
2.7 Lithium-polymerový akumulátor	9
2.8 Alkalické akumulátory	9
3 Setrvačnick	11
3.1 Zapojení setrvačnicku se spalovacím motorem	12
4 Superkapacitor	13
5 Měnič napětí pro superkapacitor	16
5.1 Režim práce měniče	16
5.2 Snižovací měnič napětí	16
5.3 Zvyšovací měnič napětí	18
5.4 Řízení rekuperačnickho měniče	19
5.4.1 Regulačnick schéma	20
5.4.2 Regulátor napětí	20
5.4.3 Regulátor proudu	20
5.5 Přepěťový obvod měniče	21
6 Zařizení EPOS	22
7 Simulace systému akumulace elektrické energie v tramvaji	24
7.1 Obvod pro akumulaci elektrické energie	24
7.2 Schéma v Simulinku	25

7.3	Blok dvouhodnotového řízení	26
7.4	Porovnání odběru proudu z troleje s/bez využití superkapacitorů	26
8	Vývojový diagram	29
9	Závěr	31
	Reference, použitá literatura	33
	Přílohy	35
A	Simulace	35

Seznam obrázků

2.1	Vnitřní struktura otevřeného olovněného akumulátoru, převzato z [10] . . .	4
2.2	Konstrukce NiCd akumulátoru knoflíkového tvaru, převzato z [3]	7
2.3	Konstrukce NiCd akumulátoru válcového tvaru, převzato z [3]	7
2.4	Vnitřní struktura alkalické baterie, převzato z [10]	10
3.1	Setrvačnický, převzato z [9]	11
3.2	Schéma návrhu zapojení setrvačnicku se spalovacím motorem, převzato z [9]	12
4.1	Vnitřní struktura superkapacitoru a elektrolytického kondenzátoru, pře- vzato z [10]	13
4.2	Srovnání parametrů akumulátorů na bázi kondenzátoru, elektrochemického a na bázi superkondenzátorů, převzato z [10]	14
5.1	Schéma rekuperačního obvodu měniče, převzato z [8]	17
5.2	Schéma snižovacího měniče, převzato z [8]	17
5.3	Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě snižovacího měniče, převzato z [8]	18
5.4	Schéma zvyšovacího měniče, převzato z [8]	19
5.5	Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě zvyšovacího měniče, pře- vzato z [8]	20
5.6	Schéma řízení napěťového měniče, převzato z [8]	21
6.1	Místo aplikace zařízení EPOS v Plzni, převzato z [6]	23
6.2	Energetická posilovací stanice EPOS, převzato z [6]	23
7.1	Silové schéma tramvaje	25
7.2	Blok dvouhodnotového řízení	27
7.3	Porovnání odběru proudu z troleje s/bez využití superkapacitorů	28
8.1	Vývojový diagram regulace napětí v meziobvodu	29
8.2	Vývojový diagram kompletní regulace	30
A.1	Schéma simulace	35

A.2 Průběhy proudů a napětí při omezení proudu superkapacitorem na 150 A, shora: proud do trakčního měniče, proud superkapacitorem, napětí na superkapacitoru, napětí v meziobvodu (na Cf) a proud z troleje	36
A.3 Průběhy proudů a napětí při omezení proudu superkapacitorem na 500 A, shora: proud do trakčního měniče, proud superkapacitorem, napětí na superkapacitoru, napětí v meziobvodu (na Cf) a proud z troleje	37
A.4 Průběhy proudů a napětí v zapojení bez superkacitoru, shora: proud do trakčního měniče, proud superkapacitorem, napětí na superkapacitoru, napětí v meziobvodu (na Cf) a proud z troleje	38

1

Úvod

Cílem práce je vytvořit stručný přehled nejpoužívanějších akumulátorů v elektrických zařízeních. Dále sestavit obvodové schéma tramvaje a popsat funkci dvoukvadrantového pulsního měniče. Následně provést simulaci celého zapojení. Simulace bude provedena v prostředí Matlab (Simulink, Plecs), ze které bude vytvořen vývojový diagram znázorňující algoritmy řízení pro implementaci do procesorového řízení.

První část práce obsahuje stručný přehled nejpoužívanějších akumulátorů v elektrických zařízeních. U těchto akumulátorů jsou uvedeny jejich principy, parametry a využití v praxi. Další kapitola obsahuje popis setrvačnicku a jeho zapojení se spalovacím motorem. V následující části práce je uveden popis superkapacitoru, jeho struktura a parametry. V další kapitole je podrobný popis funkce a způsob řízení pulsního měniče napětí. V navazující kapitole je stručně popsáno zařízení EPOS, jehož funkce využívají Plzeňské městské dopravní podniky. V další části je vytvořena simulace rozjezdu, jízdy a brzdy tramvaje se zapojenými superkapacitory v prostředí Matlab (Simulink, Plecs). Simulace obsahuje průběhy proudu a napětí superkapacitoru, průběh napětí a proudu odebíraného z troleje a průběh napětí v meziobvodu. V poslední kapitole práce jsou vytvořené zjednodušené vývojové diagramy, které slouží jako podklady pro implementaci do procesorového řízení.

2

Akumulátor

Akumulátor je technické zařízení, které se využívá k akumulaci nejčastěji elektrické energie. Jedná se o zařízení, které se řadí mezi sekundární články, protože je potřeba akumulátor nejprve nabít a až poté je možné odebírat energii. Kdežto primární články se dají využít k odběru energie ihned po svém sestavení. Akumulátory pracují na různých principech. Nejčastějšími jsou akumulátory pracující na elektrochemickém principu, což znamená, že elektrická energie se převede na energii chemickou, v níž se uchová a následně zpět na elektrickou. V podstatě to funguje tak, že přivedený elektrický proud způsobí změnu elektrochemického potenciálu na elektrodách. Vlivem těchto změn se z elektrod dá čerpat zpět elektrická energie. Z důvodu malého napětí na článcích elektrochemických akumulátorů se tyto články sdružují do akumulátorových baterií, aby dosáhly vyšších napětí.

2.1 Rozdělení akumulátorů

Podle provedení:

- otevřené
- uzavřené (též hermetické nebo řidčeji plynotěsné)

Podle typu elektrolytu:

- s kyselým elektrolytem
- se zásaditým elektrolytem
- s bezvodým elektrolytem

Podle principu:

- Olověný (Pb)

- Nikl-kadmiový (NiCd)
- Nikl-metal hydridový (NiMH)
- Nikl-železný (Ni-Fe)
- Nikl-zinkový (Ni-Zn)
- Stříbro-zinkový (Ag-Zn)
- Lithium-iontový (Li-ion)
- Lithium-polymerový (Li-Pol)
- Lithium-železo-fosfátový akumulátor (Li-FePO₄)
- Sodíkovo-sírový (Na-S)
- Alkalický (RAM)
- Ostatní

Podle použití:

- průmyslové akumulátory
- standardní aplikace
- vojenské aplikace
- pro vysoké odběrové proudy
- rychlonabíjecí
- pro trvalé dobíjení
- pro vysoké teploty
- s MBU (Memory Back-up)

Podle tvaru:

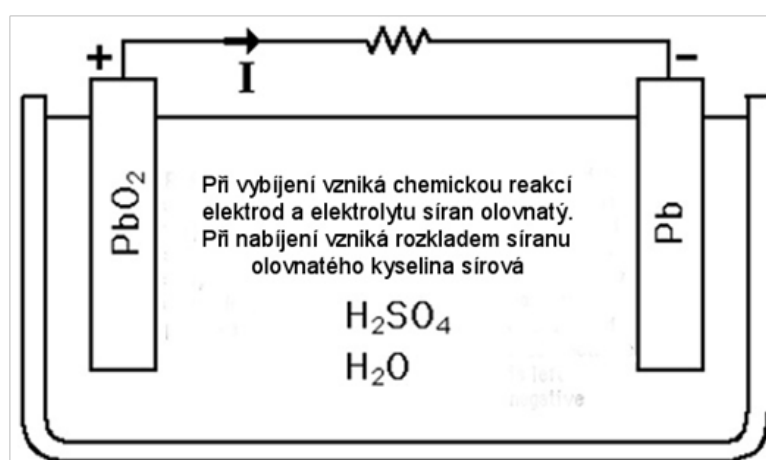
- válcové (tužkové)
- prizmatické
- diskové (knoflíkové)
- hranolovité (+ jejich sestavy)

Podle technologie výroby:

- stáčené desky (sintrované, plastem pojené, kombinované)
- ploché desky (lisované, sintrované, plastem pojené, kombinované)

2.2 Akumulátor olověný otevřený

Olověný akumulátor je sekundární galvanický článek, jehož materiál elektrod je na bázi olova. Každá elektroda je ovšem s ohledem na materiál rozdílná. Na záporné elektrodě je houbovitě olovo, které se při nabíjení mění na síran olovnatý (PbSO_4) a ten zpět při vybíjení na olovo, kdežto na kladné elektrodě je oxid olovičitý. Olovo je používáno z toho důvodu, že má schopnost dodat najednou velký proud bez poškození, což je případ startování automobilu, u kterých se tyto typy akumulátorů nejčastěji používají. Jeho elektrolytem je vodou zředěná kyselina sírová o koncentraci přibližně 35 % v plně nabitém stavu. Tento roztok se napouští do speciální vaty, složené ze skelných vláken. Při vybíjení klesá koncentrace elektrolytu a naopak při nabíjení roste.



Obr. 2.1: Vnitřní struktura otevřeného olověného akumulátoru, převzato z [10]

U těchto akumulátorů dochází k tzv. samovybíjení, což znamená, že se akumulátor vybíjí i bez připojení k elektrickému obvodu. Hodnota samovybíjení se pohybuje od 3 % celkové kapacity za měsíc, což se týká novějších typů, až do 20 % celkové kapacity za měsíc, což je případ akumulátorů starších a opotřebovaných. Tyto typy baterií mají jako výhodu velmi dobrou účinnost, řádově se pohybují kolem 80 %, malý pokles napětí při zatížení, dobrý poměr mezi kapacitou a rozměry baterie a jak bylo již zmíněno, možnost velkého odběru proudu bez poškození. Kapacity se pohybují v rozmezí od 1 do 10 000 Ah. V automobilech bývají kapacity od 35 do 150 Ah. Z olovnatého článku je možné odebírat až stovky ampér krátkodobě, pro dlouhodobý odběr se počítá s proudem nanejvýš 1/3 jeho kapacity.

U olovnatých akumulátorů dochází k tzv. sulfataci. Sulfataci způsobuje dlouhodobé nevyužívání, či skladování v nenabitém stavu. Sulfatace je jev, při kterém se vzniklé krystaly síranu olovnatého zúčastňují přeměny aktivní hmoty elektrod jen ve velmi omezené míře, v podstatě se jedná o zatvrdnutí PbSO_4 , což způsobuje pokles kapacity akumulátoru. Dalším negativním důsledkem, způsobeným sulfatací, je zvýšení vnitřního odporu, které obzvlášť u velkých odběrech proudů sníží dodávaný proud i napětí akumulátorem. Sulfataci lze poznat podle malých bílých lesklých skvrn na elektrodách. Sulfatace je zá-

vislá na teplotě a míře vybití akumulátoru. Při vyšší teplotě (nad 25 °C) a za předpokladu plně vybitého akumulátoru se sulfatace projeví již během jediného dne, při nižších teplotách v řádech dnů. Plně nabitý akumulátor je mrazuvzdorný až do -30 °C. Při demontáži těchto baterií se odpojuje nejprve kostřený vývod, při zapojování se zapojuje kostřený vývod až nakonec. Olovnaté baterie se nabíjí zdrojem stejnosměrného proudu o velikosti přibližně jedné desetiny kapacity a stejným napětím, jaký baterie dodává. Pokud se nejedná o baterie bezúdržbové, je potřeba u nich provádět kontroly hladiny elektrolytu, popřípadě elektrolyt dolít destilovanou vodou. Při nabíjení baterie se do vzduchu uvolňuje vodík a kyslík. Je tedy doporučováno nabíjet baterie v prostředí dobře větraném a v prostředí, kde nemůže dojít ke styku s otevřeným ohněm. Průměrná životnost těchto baterií bývá přibližně 350 nabíjecích cyklů, tedy přibližně 4 až 6 let, záleží však na míře používání a kvalitě údržby. Při vybití článku pod 1,75 V je baterie nevratně poškozena.

2.3 Akumulátor olověný uzavřený

Uzavřený olověný akumulátor pracuje na stejném principu jako olověný otevřený, liší se vlastnostmi elektrolytu, který je v tomto případě gelové konzistence. Díky tomu neovlivňuje jeho funkci manipulace a je možné článek montovat v libovolné poloze, jsou však citlivé na vibrace, tvrdé otřesy, na přebíjení a hluboké vybíjení. Kvůli této vlastnosti je u tohoto akumulátoru třeba použít dobře seřízenou nabíjecí automatiku nebo omezit napětí nabíječe na požadovanou hodnotu, to znamená na takovou, aby na jeden článek připadalo napětí jen 2,3 V. Uvedme na příkladu dvanáctivoltového akumulátoru, který nabíjíme napětím 13,8 V. V případě, že chceme dosáhnout co největší životnosti, ovšem při menší kapacitě se doporučuje nabíjet 12-voltový akumulátor při napětí 13,6 V. Při velkém přebíjení dochází k nafouknutí baterie a k následnému zkrácení životnosti nebo výbuchu. Stejně jako otevřený článek je třeba baterii skladovat v nabitém stavu a v období mimo provoz pravidelně živit. Nabíjecí proud může dosáhnout až třetiny kapacity baterie, totéž platí o trvalém vybíjecím proudu. Vyrábí se v kapacitách od jednotek do desítek Ah. Mrazuvzdornost je u uzavřeného akumulátoru vyšší, než u otevřeného, kolem -60°C, životnost je přes 6 let.

2.4 Akumulátor nikl-kadmiový

Nikl-kadmiová baterie je druh galvanického článku, zkráceně označená jako NiCd. Tento typ článku je zasazen do plechových, někdy i plastových obalů. Tyto články se plní pouze tehdy, je-li akumulátor vybitý a to vodným roztokem hydroxidu draselného nebo sodného. Mezi těmito látkami není výraznější rozdíl a lze je i vzájemně míchat. Jediným rozdílem je, že zatímco hydroxid sodný je dostupnější a pro tuto aplikaci dostačující, hydroxid draselný zvyšuje výkon článku při velkých mrazech. Možným vylepšením vlastností akumulátoru, například z hlediska vyšší kapacity a výkonu, je přidání hydroxidu lithného. U hydroxidů

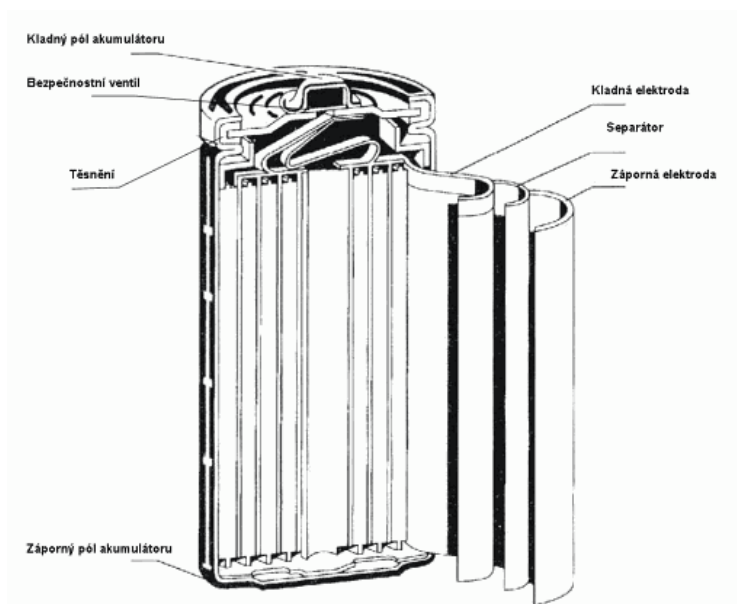
existuje riziko jejich zvětrání, proto je nutné je skladovat v uzavřených nádobách, jinak dojde k nepoužitelnosti článku. Granulovaný hydroxid se rozpouští v čisté destilované vodě. U tohoto procesu je třeba dávat velký pozor, protože hydroxid je žíravina. Tento roztok by se mohl při přípravě samovolně prudce zahřívat a mohl by začít vřít.

Elektrochemicky aktivní složkou kladné elektrody je hydroxid nikelnatý, který se při nabíjení mění v nikel-hydroxid, u záporné elektrody hydroxid kademnatý, který se mění na kovové kadmium. Tyto děje probíhají pouze do plného nabití elektrod. Pokud se v nabíjení pokračuje i po nabití článku, dochází k přebíjení, které způsobí rozklad elektrolytu – dojde k elektrolýze vody, což způsobí vznik kyslíku na kladné a vznik vodíku na záporné elektrodě. V hermetických akumulátorech, což jsou akumulátory plynotěsné, což znamená, že se neuvolňuje ani plyn ani kapalina a akumulátor je uzavřený (od uzavřených se liší tím, že nemají bezpečnostní ventil) se využívá schopnost rekombinace na záporné elektrodě. Rekombinace spočívá v tom, že tato elektroda je schopna vázat kyslík uvolňující se při nabíjení na kladné elektrodě. Kapacita elektrod musí být sestavena tak, aby při dosažení plného nabití kladné elektrody existovala na záporné elektrodě část aktivní hmoty v nenabitém stavu. Zjednodušeně to znamená, že záporná elektroda musí mít větší kapacitu, než elektroda kladná. Mezi tyto elektrody se vkládají separátory. Tyto separátory se vyrábí z materiálů prostupných pro ionty jako jsou textilie nebo papír a slouží k oddělení kladných a záporných elektrodových systémů a současně slouží jako kontakt elektrolytu s elektrodami.

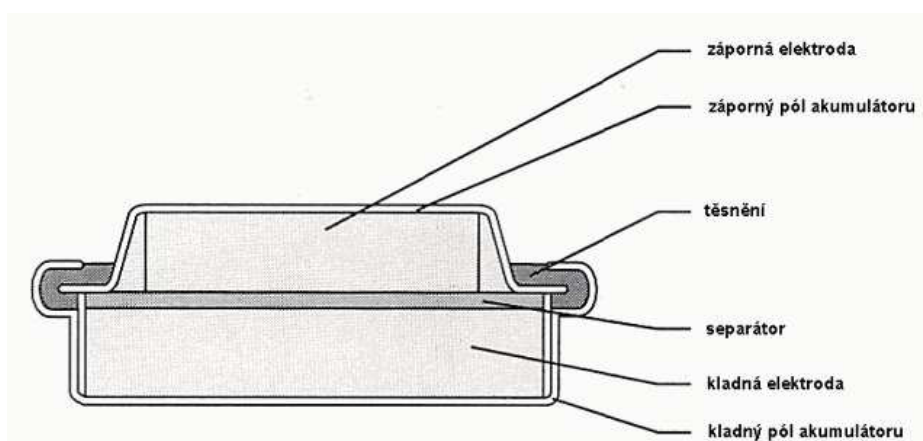
Výhodu těchto akumulátorů je dlouhá životnost, vysoká odolnost proti otřesům a necitlivost na hluboké a dlouhodobé vybití. Průměrná životnost těchto akumulátorů se pohybuje mezi deseti až dvaceti lety. Jsou však baterie, které pracují uspokojivě i po čtyřiceti letech. Úplné zničení vzniká nejčastěji vnitřním zkratem. Dalším kladnou vlastností akumulátoru je, že je možné ho skladovat zcela vybitý, aniž by se to na něm negativně projevilo. Při skladování v nabitém stavu se jeho kapacita samovybíjením vyčerpá za 6 měsíců. Mezi nevýhody se dá zařadit špatná účinnost, která se pohybuje okolo 60 %, špatný poměr mezi kapacitou a rozměry a malý vybíjecí proud. Paměťový efekt, který způsobuje snižování kapacity v případě, že není článek před nabíjením zcela vybitý, se u těchto baterií projevuje jen okolo 10% procent ztráty kapacity.

2.5 Akumulátor nikel-metalhydridový

Tato baterie je podobná baterii nikel-kadmiové. Tyto baterie se značí Ni-MH a používají se převážně v automobilech. Anoda je tvořena na bázi sloučenin niklu, záporná elektroda zase ze slitiny pohlcující vodík. Jako elektrolyt se používá zředěný roztok hydroxidu. Při vybíjení se redukuje sloučenina na anodě, kterou je například nikloxid-hydroxid s vodou na nikelhydroxid a při tom se odebírají z každé molekuly jeden elektron. Tímto procesem se vytvoří skupina hydridů, která putuje ke katodě a předá jí jeden elektron a jeden atom vodíku. Tento proces pak při nabíjení probíhá opačně. Tyto články jsou neškodné



Obr. 2.2: Konstrukce NiCd akumulátoru knoflíkového tvaru, převzato z [3]



Obr. 2.3: Konstrukce NiCd akumulátoru válcového tvaru, převzato z [3]

vůči životnímu prostředí a ve srovnání s nikel-kadmiovými bateriemi mají vyšší výkon i energetickou hustotu. Nevýhodou je však menší počet nabíjecích cyklů a častý výskyt paměťového efektu.

2.6 Lithium-iontový akumulátor

Lithium-iontový akumulátor, zkratkou Li-ion, je jedním z nejpoužívanějších druhů baterií a to díky vysoké hustotě energie vzhledem k objemu. Proto se hodí pro přenosná zařízení. Li-ion se nejčastěji používá ve spotřební elektronice. Pracuje na principu přenosu iontů lithia od anody, tedy záporné elektrody ke kladné elektrodě – katodě při vybíjení a naopak. Kladná elektroda je vyrobena z oxidu kovu, anoda zase z grafitového uhlíku. Elektrolyt je typicky směs organických uhličitánů, například ethylen-uhličitánem. Tyto

nevodivé elektrolyty obecně používají nekoordinující aniony soli. V podstatě je to lithiová sůl v organickém rozpouštědle.

Li-ion baterie se používá buď ve formě jednotlivých článků nebo v tzv. akupacích. Jednotlivé články se používají ve speciálních aplikacích, kdežto akupaky se používají v mobilních telefonech, přenosných počítačích nebo videokamerách. Tyto akupaky jsou vybaveny ochrannými obvody, které zabraňují jejich zničení v případě nesprávného používání baterie, závadě na přístroji, který akumulátor napájí či závadě na nabíječce. Tyto ochranné obvody kontrolují maximální a minimální napětí na článku, popřípadě i maximální vybíjecí a nabíjecí proud. Při překročení těchto již nastavených mezí, obvod článěk odpojí. Tyto obvody nejsou připojeny k článku přímo. Z toho plyne, že odebírají z článku trvale proud řádu jednotek až desítek mikroampér. Akupak je také vybaven termistorem, který informuje nabíječku o teplotě článku.

Li-ion baterie se nabíjí standardně ze zdroje napětí s omezením nabíjecího proudu a je velmi důležité přesně dodržet konečné nabíjecí napětí. Již malé překročení nabíjecího napětí zkracuje životnost článku, při nabíjecím napětí menším se článek nenabije na plnou kapacitu. Toto nabíjení se pohybuje kolem 4,1 V, záleží na typu článku. Jinak je to s nabíjecím proudem, který nikterak neovlivňuje životnost, avšak s menším nabíjecím proudem se bude článek nabíjet déle. Tyto proudy se pohybují až do hodnoty 450 mA při 900 mAh kapacity. Li-ion články se nabíjí velmi rychle. Nabíjí se proudem tak dlouho, dokud napětí na článku nedosáhne konečného nabíjecího napětí. Proud, kterým nabíjíme, nemusí být konstantní, stačí pouze, aby byl nižší než maximální nabíjecí proud. V momentě, kdy dosáhne článek konečného nabíjecího napětí, je nabit přibližně na 70 % své kapacity za předpokladu, že byl předtím vybit. Byl-li článek vybit jen částečně, je jeho náboj v tomto okamžiku větší. Po dosažení této hodnoty, kdy se nabíjecí napětí již nemění, se nabíjecí proud postupně zmenšuje. Článek je nabitý za předpokladu, že tento nabíjecí proud klesne až k nule. Tento jev je výhodou, neboť tím předchází přebití článku, z čehož plyne, že článek můžeme nabíjet libovolně dlouho. U nových či hluboce vybitých článků, je nabíjení velmi pomalé. Nabíjí se proudy řádů jednotek miliampér. Nelze je nabíjet rovnou velkými proudy, protože by se mohly poškodit. Nabíjí se tak dlouho, dokud jejich napětí nedosáhne na 2,7- 3 V. Toto formování článků trvá velmi dlouho, řádově až hodiny. K této situaci však dochází jen zřídka, výrobci tyto baterie dodávají většinou již nabitě nebo zařízení, které napájíme těmito články, jsou nastaveny tak, že se ještě před hlubokým vybitím vypnou.

Mezi výhody patří malý objem a hmotnost, neúčast paměťového efektu, trpí minimálním samovybíjením (do 5 %) a velká životnost (500 až 2000 nabíjecích cyklů). Naopak špatnou vlastností je náchylnost na výbuch nebo vznícení při nesprávném používání, jako je například zkratování nebo nabíjení na vyšší kapacitu než je baterie schopna pojmout. Kromě spotřební elektroniky se často využívají pro elektrická vozidla a letecký průmysl. Tyto baterie jsou stále běžnější náhrada za olověné baterie, které byly použity v minulosti u užitkových vozidel. Namísto těžkých olověných desek a kyseliny elektrolytu, se použí-

vají lehké Lithium-iontové baterie. Mohou poskytnout stejné napětí jako olověné baterie s menšími nároky na rozměry a s menším dopadem při případném poškození na životní prostředí.

2.7 Lithium-polymerový akumulátor

Lithium-polymerový akumulátor také označovaný jako Li-Pol, je jeden z novějších typů elektrických akumulátorů. Tento typ je vyvinut z lithium-iontových článků. Anoda je buď z grafitového nebo amorfního uhlíku a katoda z různých kovových solí. Podstatnou změnou mezi těmito dvěma typy baterií je však v elektrolytu, kterým je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Každý článek musí být v pevném a těsném pouzdře, což ovlivňuje tvar vyrobeného akumulátoru. Li-Pol vážou lithiovou sůl do pevného polymerického kompozitu, který má obvykle konzistenci tužšího gelu, nejčastěji do polyethyenu nebo polykrylonitrilu. Tyto komponenty se následně upevňují na sebe, což umožňuje tvarovat baterii dle potřeb výrobce. Nutné je pro článek jeho krytí, které, zajišťuje kovová folie. Při velkých výkonech může totiž být tepelná roztažnost materiálu natolik rozdílná, že hrozí roztržení.

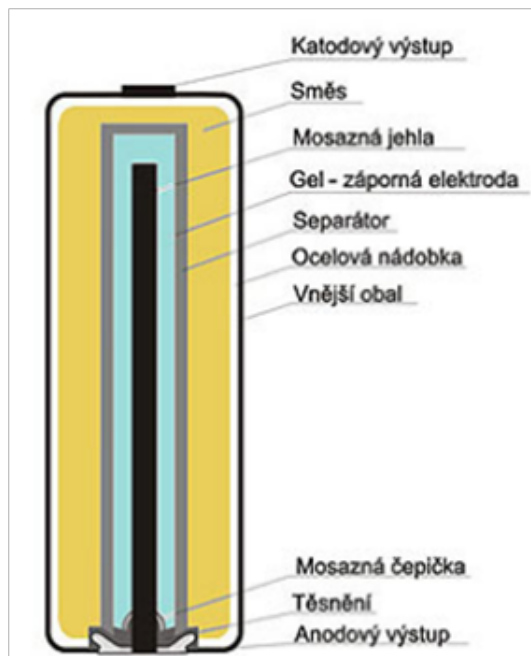
Články dodávají napětí od 2,7 V při vybitém stavu až do 4,23 V v nabitém stavu. Při poklesu pod 2,5 V dochází k degradaci článku, který následně ztratí své schopnosti. Při přebití článku dochází ke zkrácení životnosti, přehřívání a následnému vznícení nebo výbuchu. Články jsou náchylné na vysoké teploty. Zlepšené vlastnosti u Li-Pol baterií jsou nižší hmotnost a objem, vyšší kapacita, velká výkonnost, nižší samovybíjení a vysoký počet nabíjecích cyklů. Tento počet bývá kolem 1 000 cyklů před poklesem pod 60 % původní kapacity. Dále společnými kladnými vlastnostmi s Li-ion jsou odolnost proti paměťovému efektu, minimální samovybíjení a vysoké jmenovité napětí, které je až 3,6 V.

Použití je jako u Li-ion článků, to znamená v mobilních telefonech, noteboocích, fotoaparátech apod. Tento druh článků se, ale využívá pouze minimálně. Důvodem je cena, protože náklady na technologii výroby jsou vysoké, proto se tyto články objevují pouze ve špičkových produktech. Je totiž nutné do každého článku vkládat logické obvody (čipy), kvůli relativně obtížnému nabíjení a vybíjení. Škodí jim také úplné vybití, kterému ovšem bývá zamezeno vhodnou volbou ochranných obvodů.

2.8 Alkalické akumulátory

Alkalické akumulátory, označované jako akumulátory RAM (Rechargeable Alkaline Manganese) jsou dnes nejrozšířenějšími články na trhu. Tyto články jsou založené na chemické reakci zinku s oxidem manganičitým. Katoda baterie je tvořena slisovanými kroužky oxidu manganičitého, který je navíc z důvodu zvýšení vodivosti nasycený grafitem. Tyto kroužky se lisují do poniklovaného ocelového kalíšku, který tvoří pouzdro a zároveň kladný vývod článku. Do katody se dále přidávají přísady, které umožňují opakované nabíjení. Od katody je membránou, oddělena anoda, která je z nasyceného práškového zinku. Vývod

anody je ocelová pozlacená nebo mosazná jehla s čepičkou, která tvoří záporný vývod. Již zmíněná membrána je z netkané textilie a celofánu a zabraňuje zkratu mezi elektrodami a zároveň umožňují průběh chemické reakce. Obal baterie, jak již bylo zmíněno, je ocelový válec, který je na obou stranách uzavřen destičkou z niklu. Elektrolytem v alkalických článcích je hydroxid draselný.



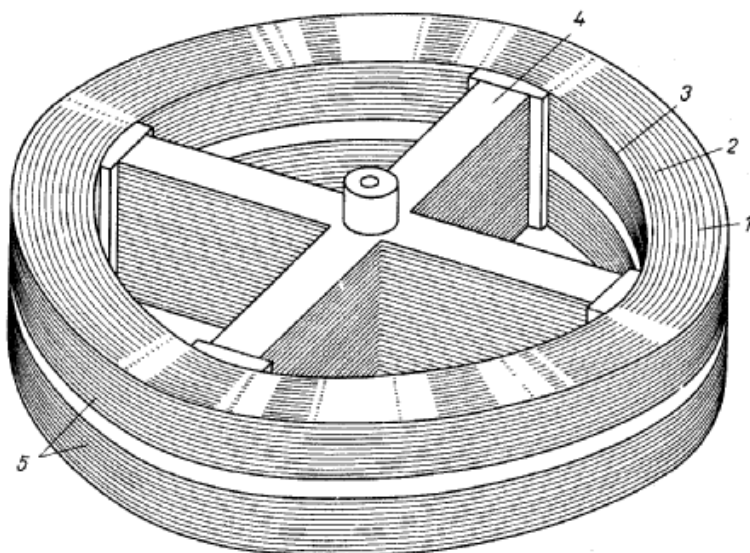
Obr. 2.4: Vnitřní struktura alkalické baterie, převzato z [10]

Články RAM mají vysokou spolehlivost a ve srovnání s jinými typy zdrojů energie jsou levné. Používají se v CD přehrávačích, navigacích, dálkových ovladačích, měřících přístrojích a zařízeních s trvalými odběry proudu nad 1 A.

3

Setrvačník

Setrvačník je mechanický akumulátor vhodný pro krátkodobou akumulaci energie. Setrvačníky jsou moderním druhem akumulátoru energie. Vyrábí se z plastů, oceli nebo vláken kevlaru, které jsou pro výrobu nejideálnější díky své vysoké pevnosti v tahu, která se pohybuje okolo 3500 MPa a s hustotou 1,44 kg/dm³. U ocelových setrvačnicků je nevýhodou neúplné využití pevnosti materiálu. Největší mechanické napětí je na obvodu setrvačnicku, což je způsobeno odstředivými silami. Tyto síly mohou při překročení meze pevnosti způsobit trhliny a následnou destrukci akumulátoru. Na obrázku 3.1 je náčrt setrvačnicku.



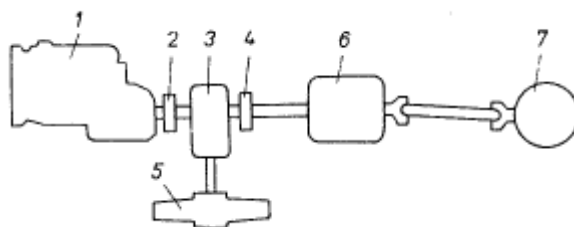
Obr. 3.1: Setrvačník, převzato z [9]

Věnc setrvačnicku je vinut z více vrstev. Vnější a střední vrstvy (1, 2) jsou z kevlaru, vnitřní vrstva (3) je z fibreglassu, což je v podstatě skleněné vlákno, které je velmi lehké a silné. Oproti uhlíkovým vláknům je z ekonomického hlediska výhodnější. Ramena (4) jsou z grafitového materiálu. Věnc setrvačnicku se skládá ze dvou dílů (5). Pro snížení ztrát třením o vzduch se setrvačnický vkládají do vzduchotěsné skříně, ze které se vzduch vy-

čerpává. Setrvačnick se před destrukcí chvějí vlivem nevyváženosti při uvolňování vláken, která se vklíní mezi samotný setrvačnick a již zmíněnou vzduchovou skříně a tím se může poškodit. Hustota energie u setrvačnicků bývá 45 Wh/kg v běžném provozu. Na hranici destrukce dosahují hodnot 65 Wh/kg až 120 Wh/kg. Výhodné využití má setrvačnickový akumulátor u elektromobilů, díky schopnosti chránit elektrické akumulátory před prudkými odběry proudu, čímž zvyšuje jejich životnost a zároveň slouží jako hybridní pohon. Hybridní pohon je označení pro kombinaci několika zdrojů energie pro pohon jednoho dopravního prostředku. Setrvačnick je schopný okamžitě přijímat a vydávat velkou energii, což je dobře využitelné při akumulaci brzděné energie dopravního prostředku.

3.1 Zapojení setrvačnicku se spalovacím motorem

Zapojení setrvačnicku se spalovacím motorem je na obrázku 3.2.



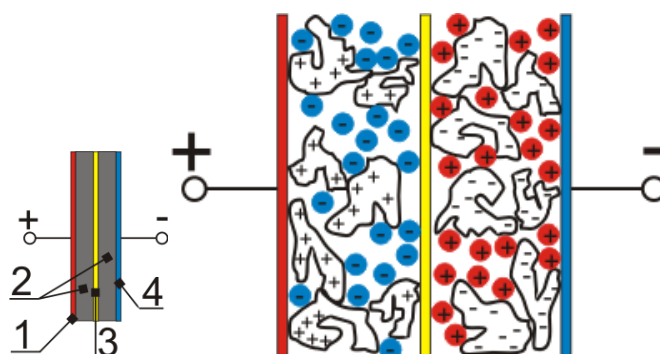
Obr. 3.2: Schéma návrhu zapojení setrvačnicku se spalovacím motorem, převzato z [9]

Spalovací motor (1) je přes spojku zapojen do rozdělovací skříně (3), která propojuje pohon hnací nápravy (7) buď s hnacím motorem (1) nebo na setrvačnickem (5). Pro případ poruchy se připojuje i vypínací pojistka (4). Dále následuje samočinná převodovka (6) s několika měnitelnými stupni.

4

Superkapacitor

Superkapacitor, jinak nazývaný také jako superkondenzátor nebo ultrakapacitor je v principu elektrolytický kondenzátor, který se vyrábí speciální technologií za účelem dosažení vysoké kapacity řádů až tisíců Faradů. Kapacita je přímo úměrná velikosti ploch elektrod a nepřímo úměrná vzdálenosti elektrod. Elektrody superkapacitorů jsou tvořeny práškovým uhlíkem, který je nanesený na hliníkové folii. Elektrody jsou odděleny separační folií a elektrolytem je organické rozpouštědlo (acetonitril). Acetonitril (nitril kyseliny octové, metylkyanid), je bezbarvá aromatická kapalina. Je to organické rozpouštědlo s vysokou dielektrickou konstantou.



Obr. 4.1: Vnitřní struktura superkapacitoru a elektrolytického kondenzátoru, převzato z [10]

Separální folie neboli separátor umožňuje zasunutí pozitivních elektrod mezi negativní, aby zabraňoval přímému styku kladných a záporných desek a tím se zmenšila tloušťka článku. Při malé tloušťce se zvyšuje počet elektrod, které lze do článku umístit. Materiál separátoru je jemnozrný a porézní. Je vyrobený většinou z křemíku a plastické hmoty, aby elektrolyt mohl pronikat ke kladným mřížkám elektrody a tak mohou být v neustálém kontaktu s elektrolytem.

Princip uchování elektrické energie vychází z vytvoření elektrochemické dvouvrstvy po připojení napětí na elektrody, které jsou ponořeny ve vodivé tekutině. Proto se také označuje jako elektrochemický dvouvrstvý kondenzátor. Energie se zde uchovává v elektrostatickém poli. V nenabitém stavu jsou částice bez náboje rovnoměrně rozloženy ve

vodivém elektrolytu mezi elektrodami. Při připojení k napětí se začnou záporné částice (ionty) pohybovat ke kladným elektrodám a naopak kladné ionty k elektrodám záporným. Na elektrodách se vytvoří dvouvrstva s rozloženým elektrickým nábojem. Hodnota napětí je omezena hodnotou disociačního napětí, při kterém jsou náboje schopny přejít z elektrod k iontům v elektrolytu. Při překročení disociačního napětí dojde k chemickým reakcím, které vytvoří vzduch a následně se superkondenzátor ničí. Tato hranice bývá rozdílná podle elektrolytu. U elektrolytu na bázi vody bývá kolem 1,2 V a elektrolytu na bázi rozpouštědla v rozmezí 2-3 V. Velká kapacita superkapacitorů je docílena díky velké ploše elektrod a velmi malé vzdálenosti jednotlivých zrněk uhlíku. Nevýhodou malých vzdáleností zrněk uhlíku, která je v řádu 10^{-10} metru, je, že omezuje provozní napětí kondenzátoru. Parametry superkapacitorů jsou srovnatelné s parametry elektrochemických zdrojů. Energie, která je uložena v těchto speciálně upravených kondenzátorech je řádově 10krát větší než v kondenzátorech běžných. Špičkové výkony dodané superkapacitorem jsou řádově v kW na 1 kg hmotnosti akumulátoru. Nevýhodou superkondenzátoru je, že uložena energie je menší než v klasických akumulátorech, avšak výhodou oproti nim je větší pohotovost, která je dána rychlejšími dobíjením a vyšší životností.

Parametr	Akumulátor na bázi kondenzátoru	Elektrochemický akumulátor	Akumulátor na bázi superkondenzátorů
Nabíjecí doba	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	1 – 5 hod	0,3 – 30 s
Vybíjecí doba	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	0,3 – 3 hod	0,3 – 30 s
Měrná energie	0,1 Wh/kg	10 – 100 Wh/kg	1 – 10 Wh/kg
Měrný výkon	100 000 W/kg	1 000 W/kg	10 000 W/kg
Životnost	500 000 a více cyklů	1 000 cyklů	500 000 cyklů
Účinnost nabíjení a vybíjení	95 a více %	70 – 85 %	85 – 98 %

Obr. 4.2: Srovnání parametrů akumulátorů na bázi kondenzátoru, elektrochemického a na bázi superkondenzátorů, převzato z [10]

Doba životnosti superkapacitoru je dána počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů při teplotě okolo 25 °C. Po každém tomto cyklu se nevratně snižuje kapacita kapacitoru a zároveň zvyšuje sériový odpor. Minimální hodnota kapacity před ukončením životnosti je 80 % kapacity jmenovité nebo dvojnásobné překročení hodnoty jmenovitého sériového odporu. Životnost těchto kapacitorů může být až 500 000 cyklů, nejnovější typy mohou dosáhnout až 1 000 000 cyklů. Tyto parametry nejsou nijak ovlivňovány mrazy a jsou zachovány i při teplotách do 40 °C. Superkapacitory se využívají ve dvou oblastech. Díky své poměrně vysoké měrné energii je superkapacitor schopen pracovat jako záložní zdroj energie

a zařízení s malým příkonem. Superkapacitor je nabíjen z primárního zdroje elektrické energie, při následném výpadku se pak stane náhradním zdrojem. Druhá oblast využití vyplývá z jeho vysokého měrného výkonu, který udává schopnost dodávat velký špičkový proud. To se využívá v oblasti hybridních pohonů u automobilů, kde pracuje jako hlavní zdroj elektrické energie spalovacího motoru. Může pracovat jako akumulátor brzděné energie a jako zdroj špičkového výkonu při startu spalovacího motoru a následnému urychlení vozidla. Při startování se odebírá velký proud v řádech několika stovek ampér, což pro běžně využívané baterie znamená přetížení a následné stárnutí těchto článků. Tento jev je superkapacitory potlačen, protože jsou schopné dodávat proud až 400 A po dobu několika sekund, což pro nastartování automobilu stačí. Před startem je však podmínkou úplné nabití superkondenzátoru, čehož docílíme akumulací brzděné energie nebo jeho pozvolným nabitím.

5

Měniče napětí pro superkapacitor

Napětí u každého kondenzátoru je pevně vázané s velikostí energie, která je v tomto kapacitoru naakumulována a jinak tomu není u superkapacitorů. Z důvodu napěťového oddělení samotného obvodu a superkapacitoru se připojuje tento článek přes napěťový měnič. Tento měnič pak tvoří jakési rozhraní dvou odlišných napěťových hladin a umožňuje přenos energie mezi nimi.

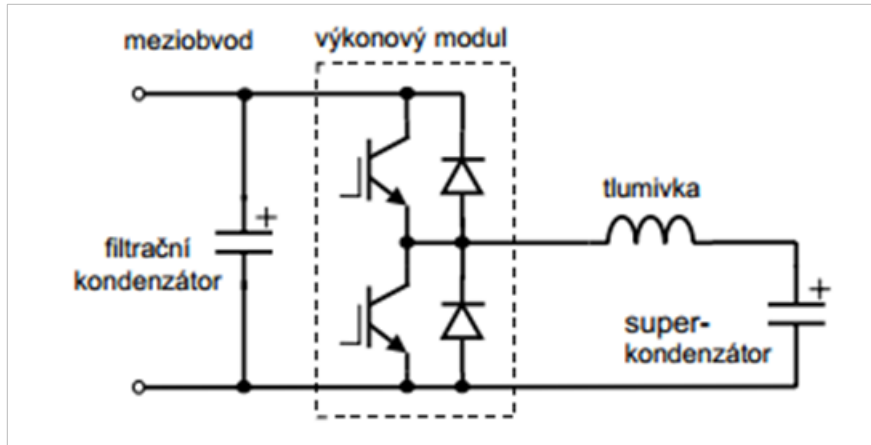
5.1 Režim práce měniče

Nejpoužívanější metodou řízení těchto napěťových měničů je pulsně-šířková modulace (PWM). Charakteristickými hodnotami tohoto způsobu řízení je spínací frekvence f a perioda spínání $T = 1/f$ a střída řízení z , která je dána poměrem doby zapnutí spínacího prvku a periody spínání T . Rozlišujeme dva režimy práce měniče podle směru toku energie, v tomto případě proudu. Při snižovacím režimu přechází energie ze strany vyššího napětí na stranu napětí nižšího. V režimu zvyšovacím je tento děj opačný. O jaký režim se jedná v konkrétním případě, rozhoduje velikost napětí v obvodu a na superkapacitoru. Schéma snižovacího nebo zvyšovacího režimu měniče vychází z rekuperačního obvodu, který je na obrázku 5.1.

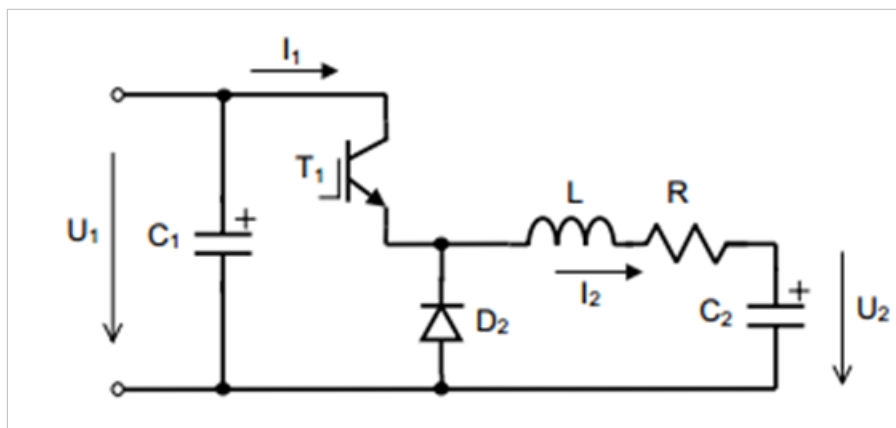
Ve schématu je akumulátor energie, v tomto případě superkapacitor, připojen přes tlumivku ke středu větve výkonového obvodu, který je tvořen dvěma spínacími prvky, ke kterým jsou antiparalelně zapojeny diody. Dioda u horního spínacího prvku zaručuje, že napětí na superkondenzátoru nebude v ustáleném stavu nikdy vyšší než v obvodu. V následujících schématech a výpočtech se předpokládá s ideálními vlastnostmi spínacích prvků, jako je nulový proud ve vypnutém stavu, nulová spínací a vypínací doba a nulový úbytek v sepnutém stavu.

5.2 Snižovací měnič napětí

Schéma snižovacího měniče je uvedeno na obr. 5.2.



Obr. 5.1: Schéma rekuperačního obvodu měniče, převzato z [8]



Obr. 5.2: Schéma snižovacího měniče, převzato z [8]

Pracuje-li měnič ve snižovacím režimu, pracuje jen horní tranzistor T_1 . Dolní tranzistor a zpětná dioda horního tranzistoru se vedení proudu nezúčastní, proto jsou tyto prvky ve schématu vynechány.

1) sepnutý tranzistor T_1

Proud protéká přes filtrační kondenzátor C_1 , tranzistor T_1 , tlumivku L , odpor R a superkapacitor C_2 . Odpor R vyjadřuje ohmický odpor tlumivky L a kapacitoru C_2 . V tomto případě, kdy je tranzistor sepnutý, platí, že $i_1 = i_2$. Při krátké periodě spínání (vlivem vysoké frekvence), je napětí v obvodě a na superkondenzátoru konstantní. Proud přes C_2 lze vyjádřit diferenciální rovnicí prvního řádu:

$$U_1 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_2, \quad (5.1)$$

ze které lze vyjádřit, že:

$$i_2 = \frac{U_1 - U_2}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.2)$$

kde τ je časová konstanta obvodu $\tau = \frac{L}{R}$.

1) vypnutý tranzistor T_1

V tomto okamžiku se zdrojem proudu v obvodu stává tlumivka L , ve které se energie akumuluje ve formě magnetického pole. Proud protéká od tlumivky L , přes odpor R , superkondenzátor C_2 a diodu D_2 zpět do tlumivky. Proud i_1 je tedy v tomto případě nulový. Proud na C_2 je opět dán rovnicí:

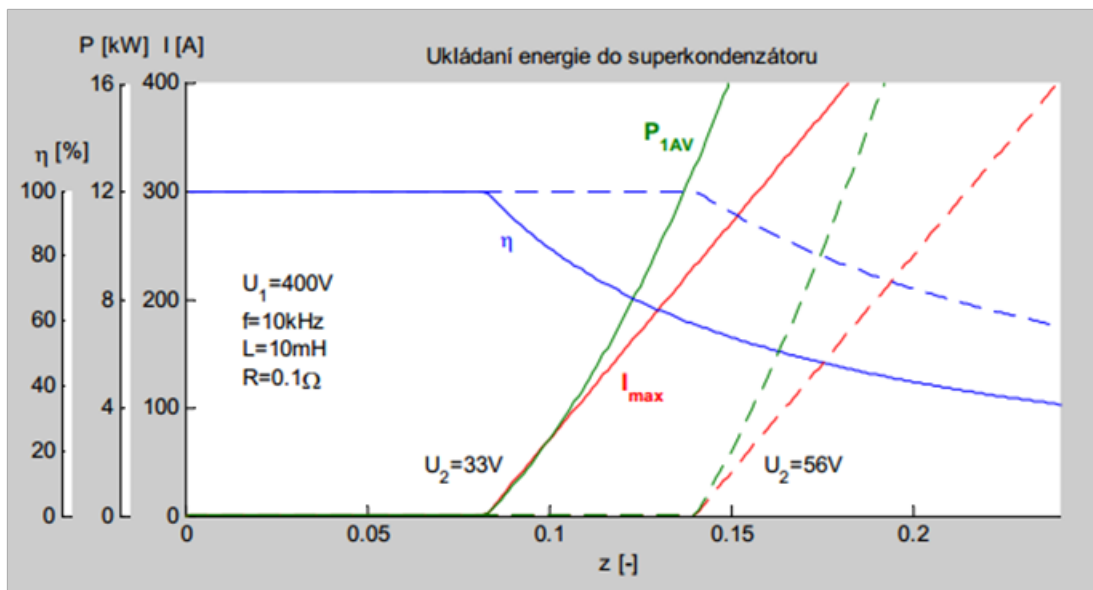
$$0 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_2, \quad (5.3)$$

ze které lze vyjádřit, že:

$$i_2 = -\frac{U_2}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_H \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.4)$$

kde I_H je maximální počáteční hodnota, ze které proud klesá k hodnotě $\frac{U_2}{R}$.

Vzhledem k přítomnosti diody D_2 nemůže být proud záporný. Dosáhne-li proud během doby vypnutí tranzistoru nulové hodnoty, mluvíme o režimu měniče s přerušovaným proudem. U přerušovaného proudu je střední hodnota proudu velmi malá, což způsobí malý přenos energie a proto napěťové měniče pracují výhradně v režimu opačném, a to v režimu s proudem nepřerušovaným.



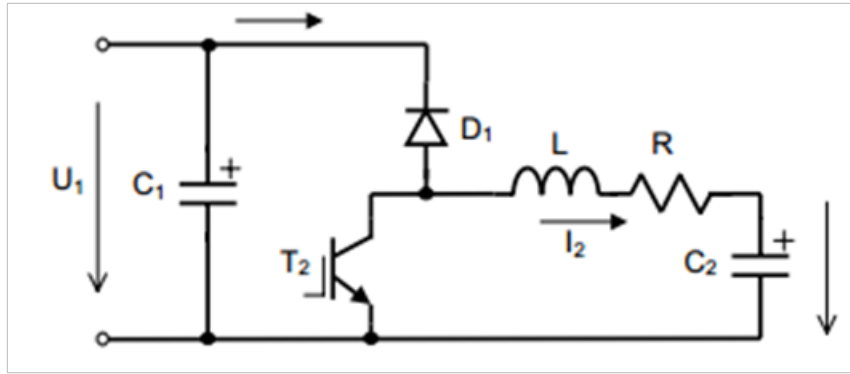
Obr. 5.3: Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě snižovacího měniče, převzato z [8]

5.3 Zvyšovací měnič napětí

U měniče zvyšovacího, je řízen tranzistor T_2 . Tranzistor T_1 a dioda D_2 se vedením proudu nezúčastňují a proto se ve schématu neobjevují.

1) sepnutý tranzistor T_2

Proud protéká přes kondenzátor C_2 , odpor R , tlumivku L a tranzistor T_2 . V tomto režimu, je i_1 nulový a proud superkondenzátorem je dán:



Obr. 5.4: Schéma zvyšovacího měniče, převzato z [8]

$$U_2 = -R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt}, \quad (5.5)$$

z toho plyne:

$$i_2 = -\frac{U_2}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.6)$$

kde opačné znaménko u proudu napovídá, že proud je v opačném směru, než je zvolený směr ve schématu uvedeném na obr. 5.4.

1) vypnutý tranzistor T_2

V okamžiku vypnutí tranzistoru T_2 , převezme proud dioda D_1 . Proud poteče přes tlumivku L , odpor R superkondenzátor C_2 a kondenzátor C_1 . V tomto případě bude proud $i_1 = i_2$. Proud kondenzátorem dán rovnicí:

$$U_2 = -R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_1, \quad (5.7)$$

jejímž řešením je proud klesající z počáteční maximální hodnoty I_H k hodnotě $\frac{U_1 - U_2}{R}$:

$$i_2 = \frac{U_1 - U_2}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_H \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.8)$$

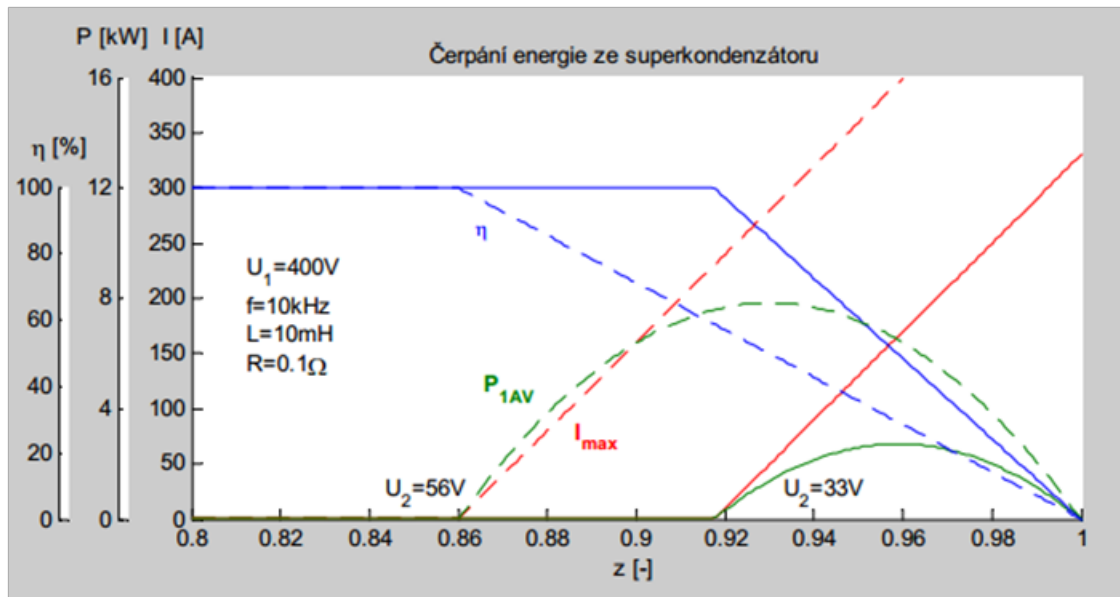
Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě zvyšovacího měniče je uvedena na obr. 5.5.

5.4 Řízení rekuperačního měniče

Pro správnou funkčnost již zmíněného rekuperačního měniče je třeba sestavit řídicí obvod, který bude nastavovat a udržovat požadované hodnoty napětí v meziobvodu a zároveň požadovaný stav nabití superkondenzátoru. Z rovnice

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_i^2 \quad (5.9)$$

plyne, že stav nabití na superkondenzátoru je úměrný jeho napětí. Znamená to tedy, že úkolem řízení měniče je nastavovat a udržovat požadovanou hodnotu napětí i na superkondenzátoru.



Obr. 5.5: Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě zvyšovacího měniče, převzato z [8]

5.4.1 Regulační schéma

Na obrázku 5.6 je návrh dvoustupňového regulátoru napětí v meziobvodě. Vstupem do regulátoru napětí je odchylka skutečné hodnoty napětí u_1 a hodnotou požadovanou u_1^* . Proud i_2 , který vychází z tohoto regulátoru je proudem požadovaným pro superkapacitor. Vstupem do regulátoru proudu je odchylka mezi skutečným proudem i_2 a proudem požadovaným i_2^* . Z regulátoru proudu je výstupem střída řízení měniče z . Střída měniče je hodnota, která udává poměr časů, ve kterých je signál v jednotlivých úrovních. Střída řízení je vstupem do pulsně-šířkového modulátoru (PWM). Z PWM vycházejí řídicí pulsy pro výkonové spínací prvky měniče. Blok OVP (Over Value Protection) blokuje řídicí impulsy, překročí-li měřené veličiny povolenou mez.

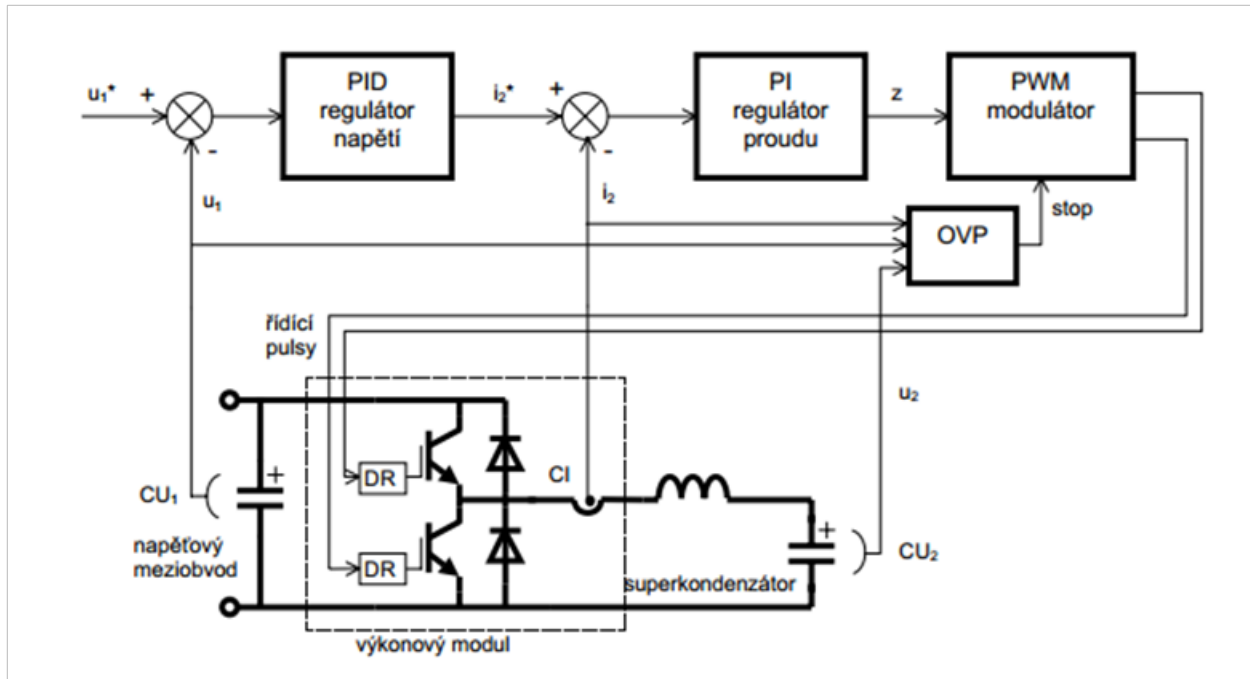
5.4.2 Regulátor napětí

Regulátor napětí je typu PID. Na výstupu tohoto regulátoru je požadovaný proud, který vede do regulátoru proudu. Tento proud musí být omezován, aby nedocházelo k proudovému přetížení obvodu a aby nepracoval s nízkou účinností. Mezní hodnota tohoto proudu se určí podle vztahu:

$$I_{2AV(P_{max})} = -\frac{U_2}{2 \cdot R} \quad (5.10)$$

5.4.3 Regulátor proudu

Proudový regulátor je navržený jako PI. Jeho výstupem je hodnota střidy PWM. Existuje taková hodnota střidy PWM, při které dosahuje příkon meziobvodu maxima. V ustáleném stavu tedy nemá smysl nastavovat vyšší střidu, protože výkon se již nezvýší, naopak dojde k jeho poklesu a k růstu ztrát na ohmickém odporu obvodu, který je tvořen tlumivkou a



Obr. 5.6: Schéma řízení napěťového měniče, převzato z [8]

vnitřním odporem superkapacitoru. Výstup proudového regulátoru by se měl tedy omezovat, aby měniči neklesla příliš účinnost. Nevýhodou tohoto omezení může být zpomalení nárůstu střední hodnoty proudu při přechodových stavech, tedy zhoršení dynamických vlastností. Tento nedostatek můžeme vykompenzovat omezením výstupu regulátoru napětí.

5.5 Přepěťový obvod měniče

Přepěťový obvod měniče plní ochrannou funkci meziobvodu a k němu připojených zařízení, tedy měničů. Tento ochranný obvod je potřebný v situaci, kdy energie dodávaná do meziobvodu není současně odváděna. Tento děj způsobí velký nárůst napětí. Tento nárůst bývá kvůli malé kapacitě filtračních kondenzátorů prudký. Při dosažení maximální povolené hodnoty napětí je třeba výkon spotřebovávat a zabránit tak dalšímu růstu napětí a z toho důvodu se přidává do měniče přepěťový obvod.

Tento obvod bývá tvořen jedním spínacím IGBT tranzistorem a ovládací jednotkou, který pracuje na principu porovnávání napětí a určeným maximem napětí v meziobvodu. Sepnutí IGBT tranzistoru nastává v okamžiku, kdy se toto maximum překročí. Toto sepnutí způsobí vybíjení filtračních kondenzátorů do brzděného odporu. K tomuto odporu je nutné zapojit paralelně zpětnou diodu, kvůli potlačení parazitní indukčnosti odporu, která by mohla způsobit přepětí a následný průraz IGBT v okamžiku jeho vypnutí. Energie, která se touto ochranou maří, je ve formě Joulových ztrát a mění se v teplo.

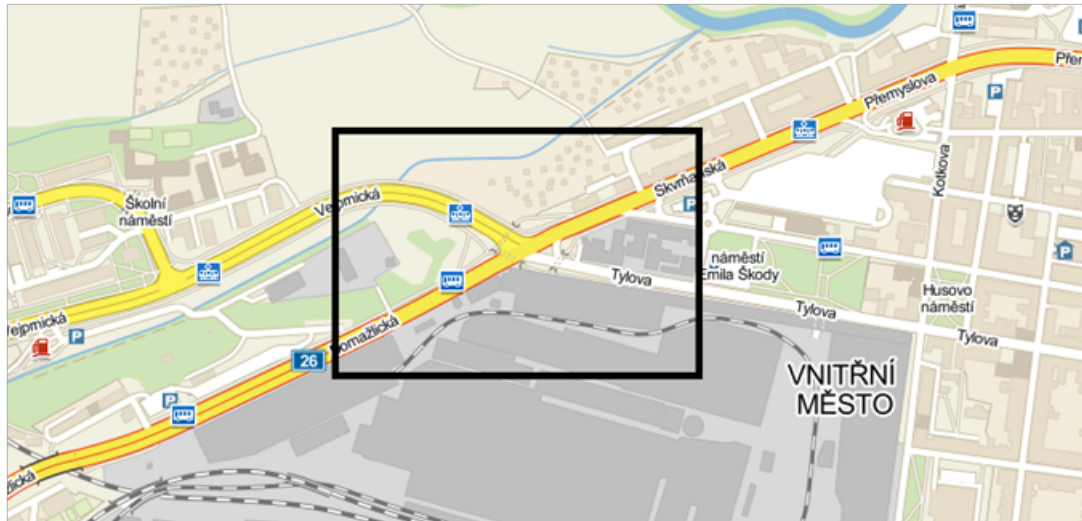
6

Zařízení EPOS

Superkondenzátory jsou velkým příslibem do budoucna v oblasti dopravních prostředků a jejich úspornosti, a to zvláště ve městech, kde se dopravní prostředky, jakými jsou tramvaje a trolejbusy, často rozjíždějí a brzdí. Již dříve proběhla řada pokusů s velkými setrvačníky, avšak jejich vlastnosti nebyly dostatečně dobré pro jejich výhodnou aplikaci do praxe. V podstatě se jedná o myšlenku akumulace energie, která vznikne při brzdění a rekuperací se vrací do stejnosměrné sítě a následně její využití při rozjezdu. Plné využití rekuperace bylo omezeno vlastností měničů, které nebyly schopny vracet tuto energii zpět do sítě. Navíc trolejová síť je kvůli bezpečnosti rozdělena na řadu krátkých úseků, což umožní brzdící tramvaji předat energii pouze tramvaji, která tento daný úsek sdílí. Zařízení, nazývané jako Energetická posilovací stanice (EPOS) od firmy OHL ZŠ, které bylo poprvé úspěšně otestováno v Plzni v roce 2009, je schopné tyto nedostatky omezit. Hlavními funkcemi tohoto zařízení je akumulace energie a její následné přelévání. EPOS byl nainstalován v blízkosti křižovatky Domažlické a Vejprnické ulice, kde se potkávají linka tramvaje č. 2 a trolejbus linky č. 12 (viz obr. 6.1). Dosud bylo napájení obou trakcí odděleno a trolejbusová trať navíc trpěla nedostatečným napájením, což způsobovalo velké ztráty a občasné výpadky.

Díky zařízení EPOS je v případě potřeby možné dočerpávat z tramvajové tratě energii do tratě trolejbusové. Další možností je proud energie opačný, který se využije v případě, kdy více trolejbusů brzdí a tato brzdná energie se využije k rozjezdu tramvaje. Tento děj přináší významné snížení ztrát až v řádech stovek kilowatt. Trolejbusová trať a tramvajový úsek jsou napájeny z jiné měčírny. Tato skutečnost otevírá možnost rychlého příjmu, akumulace a následného vydání velkého množství energie, díky superkapacitorové baterii, která se nachází v posilovací stanici. V praxi to znamená, že vůz v daném úseku nashromáždí brzdnou energii. Tato energie se uloží do superkapacitoru a následně se využije při rozjezdu jiného dopravního prostředku.

Využití superkapacitoru v samotném dopravním prostředku je též v začátcích. Prvním trolejbusem s touto vlastností je trolejbus Trollino jezdící v estonském Tallinu. Velkou výhodou u tohoto typu vozidla je kromě úspor, také schopnost efektivní jízdy i mimo trolejové vedení. Konkrétní čísla úspory energie vozy s rekuperací udává výrobce okolo 18



Obr. 6.1: Místo aplikace zařízení EPOS v Plzni, převzato z [6]



Obr. 6.2: Energetická posilovací stanice EPOS, převzato z [6]

%. S pomocí zařízení EPOS, tedy inteligentním napájením a využitím superkapacitorů lze zvýšit množství ušetřené energie o dalších 22 %.

7

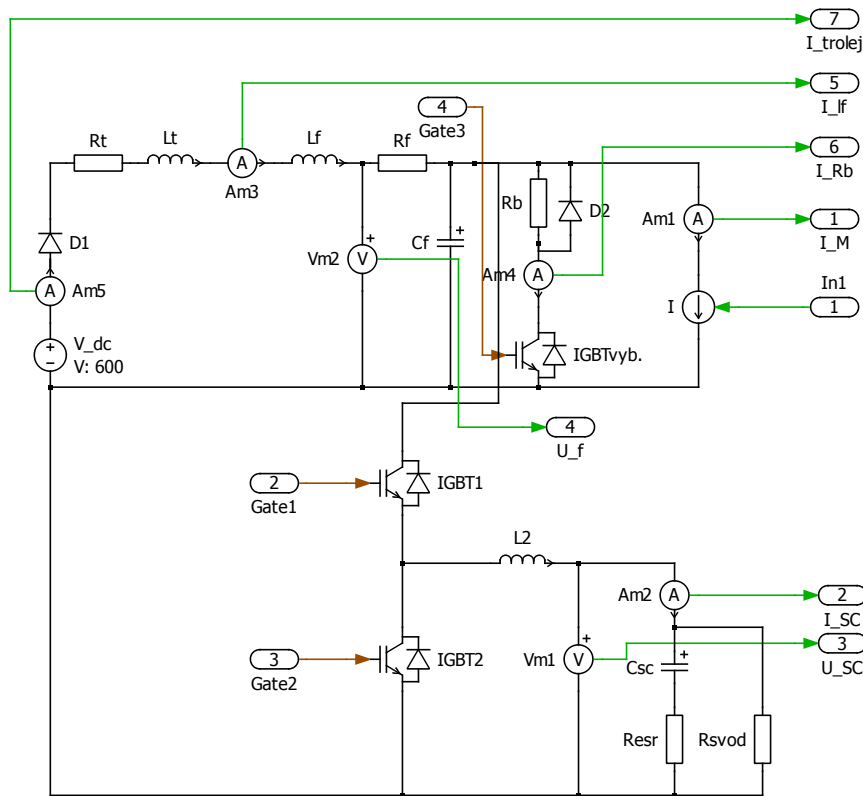
Simulace systému akumulace elektrické energie v tramvaji

Simulace byla provedena v prostředí Matlab\Simulink. Při simulaci byla použita studentská verze knihovny PLECS, která je určena pro simulace v oboru výkonové elektroniky a elektrických pohonů. Hlavním blokem je „PLECS Circuit“, v němž je z jednotlivých diskrétních součástí sestaven elektrický obvod realizující akumulaci elektrické energie v tramvaji a její opětovné využití.

7.1 Obvod pro akumulaci elektrické energie

Tramvaj je napájena z troleje o stejnosměrném napětí 600 V. Rezistor R_t představuje parazitní odpor troleje. Indukčnost L_t představuje parazitní indukčnost troleje. Meziobvod sestává z filtrační tlumivky a filtračního kondenzátoru. Pro jednoduchost je trakční měnič společně s asynchronním motorem nahrazen proměnným zdrojem proudu. Průběh tohoto proudu zhruba odpovídá proudu do střídače při rozjezdu či brzdění tramvaje. Lineární nárůst odebíraného proudu odpovídá rozjíždění s konstantním momentem. Rezistor R_{esr} představuje ekvivalentní sériový odpor superkondenzátoru. Rezistor R_{svod} poté jeho svod. Parametry superkondenzátoru byly zvoleny podle typu BMOD0063 P125 B08. Bližší údaje o tomto superkondenzátoru lze nalézt v [11].

Dvoukvadrantový pulzní měnič umožňuje přenášet elektrickou energii mezi dvěma napěťovými hladinami. Proud může být z pohledu superkondenzátoru záporný (v režimu pohon) či kladný (v režimu brzda). Při nabíjení superkondenzátoru pracuje měnič jako snižující a je spínán horní $IGBT1$ tranzistor. Spodní $IGBT2$ tranzistor je spínán při vybíjení superkondenzátoru v režimu pohon. Princip fungování dvoukvadrantového pulzního měniče je vysvětlen v kap. 5.1. Pomocí $IGBT_{vyb.}$ tranzistoru lze připojit brzdový odporník, na němž je mařena zbylá energie v režimu brzda, pokud je baterie superkondenzátorů plně nabitá a napětí v meziobvodu překročí danou mez.



Obr. 7.1: Silové schéma tramvaje

7.2 Schéma v Simulinku

Hlavní částí schématu je výše popsáný PLECS obvod. Pomocí zdroje „Repeating Sequence“ je vytvářen proměnný zdroj proudu odpovídající proudu tekoucímu do trakčního měniče. Pomocí bloků označených jako „rozlišení režimu“ jsou vytvářeny log. signály, pomocí nichž lze rozlišit, je-li tramvaj v režimu pohon či brzda. Řízení vychází z požadavku na proud z/do baterie superkondenzátorů, přičemž požadovaný proud je odvozen od okamžité hodnoty proudu do trakčního měniče (označen jako IM). Nejprve je změněno znaménko, neboť oba proudy mají opačný smysl. V režimu brzda teče proud z motoru a trakčního měniče zpět (znaménko minus) a tímto proudem je dobíjena baterie superkondenzátorů (znaménko plus) a naopak. Velikost proudu je dále nutné přepočítat. Dvoukvadrantový měnič je uvažován jako bezztrátový, při přepočtu se vychází z rovnosti výkonů:

$$I_m \cdot U_f = I_{sc} \cdot U_{sc} \tag{7.1}$$

Požadovaný proud lze poté dopočítat jako:

$$I_{sc} = I_m \cdot \frac{U_f}{U_{sc}} \tag{7.2}$$

Velikost tohoto proudu je dále omezena na 150 A v režimu brzda, resp. -150 A v režimu pohon. Řízení je realizováno jako dvouhodnotové. Hystereze je v tomto případě nastavena na 5 A. Klopný obvod RS je dle velikosti požadovaného a skutečného proudu ve stavu

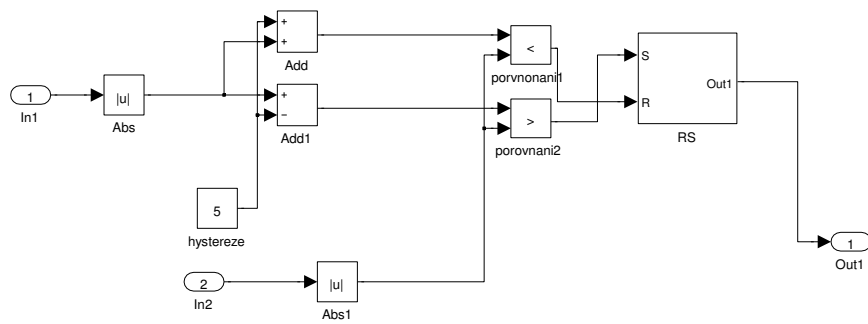
logická nula či logická jedna. Tak je spínán příslušný IGBT tranzistor dvoukvadrantového pulzního měniče. Spínání daného tranzistoru je však možné zablokovat, neboť signál z klopného obvodu prochází přes hradla AND a až poté na báze IGBT tranzistorů. To se děje automaticky pomocí logických signálů z bloků „rozlišení režimu“ tak, aby vždy spínal tranzistor odpovídající danému režimu a funkci měniče (zvyšující/snižující). Dále je spínání tranzistoru blokováno, překročí-li napětí na baterii superkondenzátorů 375 V, resp. klesne-li při vybíjení na 190 V. Tak je realizováno hlídání maximálního a minimálního napětí na superkondenzátorové baterii. Dále je sledována velikost napětí v meziobvodu. V režimu brzda se toto napětí zvýší a je pomocí dvouhodnotového řízení udržováno mezi 850 a 900 V. Po dosažení hodnoty 900 V je sepnut IGBT tranzistor a připojen brzdový odporník, na němž je mařena zbylá energie. Celé schéma je uvedeno v příloze (A) na obr. A.1.

7.3 Blok dvouhodnotového řízení

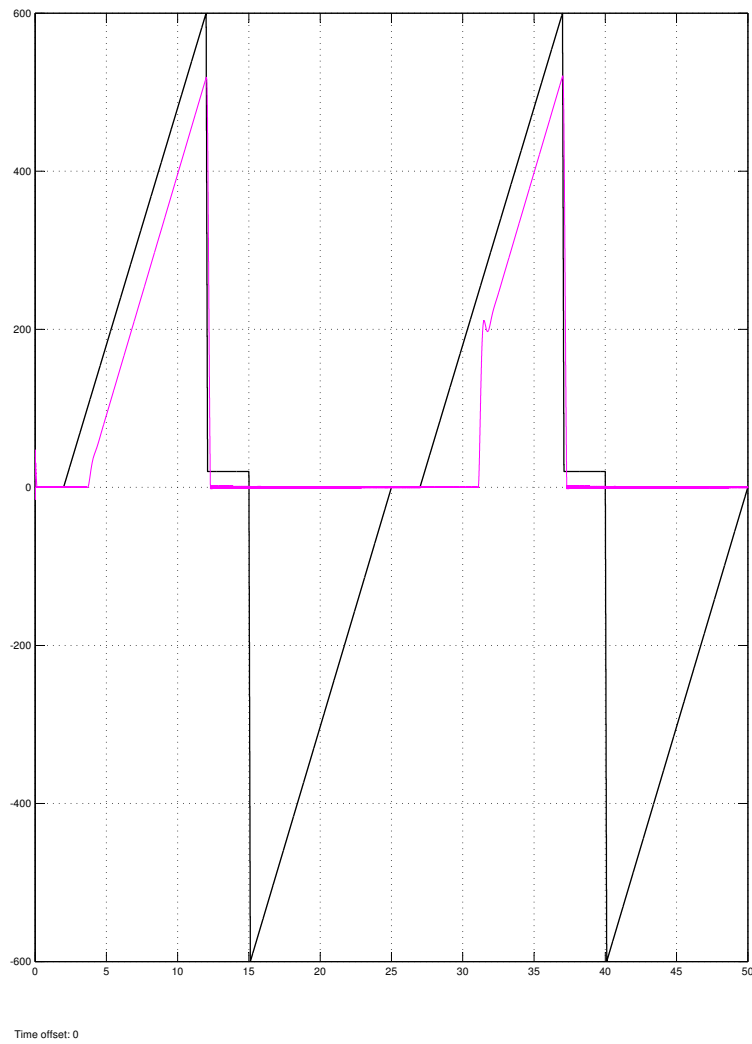
Vstup označený jako $IN1$ je požadovaná hodnota. K ní je přičtena velikost hystereze a porovnává se, je-li velikost skutečné hodnoty (vstup $IN2$) větší. Pokud ano, je nastaven výstup klopného obvodu do log. 0. Od požadované hodnoty je současně odečtena velikost hystereze a porovnává se, je-li velikost skutečné hodnoty menší. Pokud ano, je výstup klopného obvodu nastaven do log. 1. Pokud nenastane ani jedna varianta, zůstává výstup klopného obvodu v předchozím stavu. Blok dvouhodnotového řízení je ve schématu v Simulinku pro přehlednost realizován jako „Subsystem“.

7.4 Porovnání odběru proudu z troleje s/bez využití superkapacitorů

Na obr. 7.3 jsou vykresleny průběhy proudů odebíraných z troleje v zapojení s a bez superkapacitorů. Černý průběh znázorňuje proud z troleje bez použití superkacitoru, růžový průběh znázorňuje proud z troleje při použití superkapacitoru. Z tohoto grafu vyplývá, že energie uspořena zapojením superkapacitorů závisí na hodnotě nabití superkapacitoru. Při maximálním dovoleném nabití na 375 V se hodnota uspořené energie na jeden rozjezd pohybuje až okolo 30 %. Tato úspora závisí na výkonu a na průběhu cyklu.



Obr. 7.2: Blok dvouhodnotového řízení

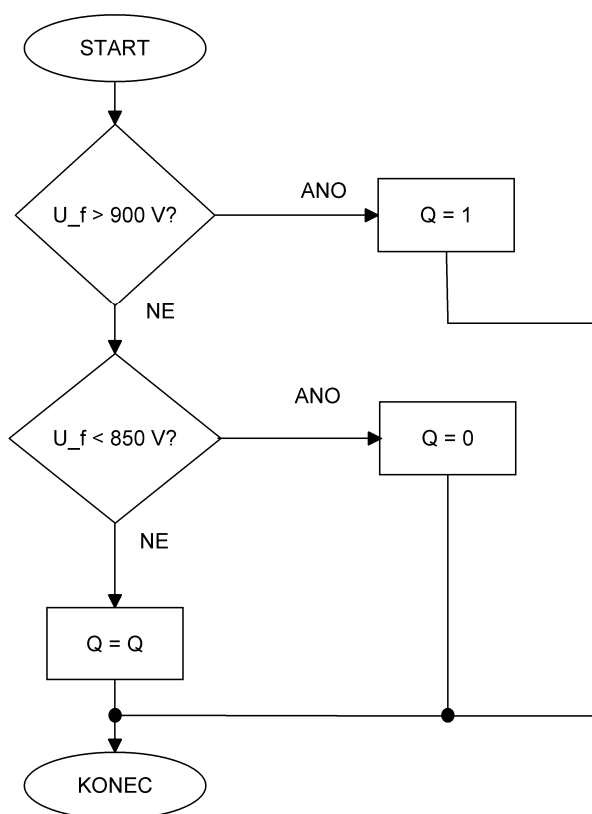


Obr. 7.3: Porovnání odběru proudu z troleje s/bez využití superkapacitorů

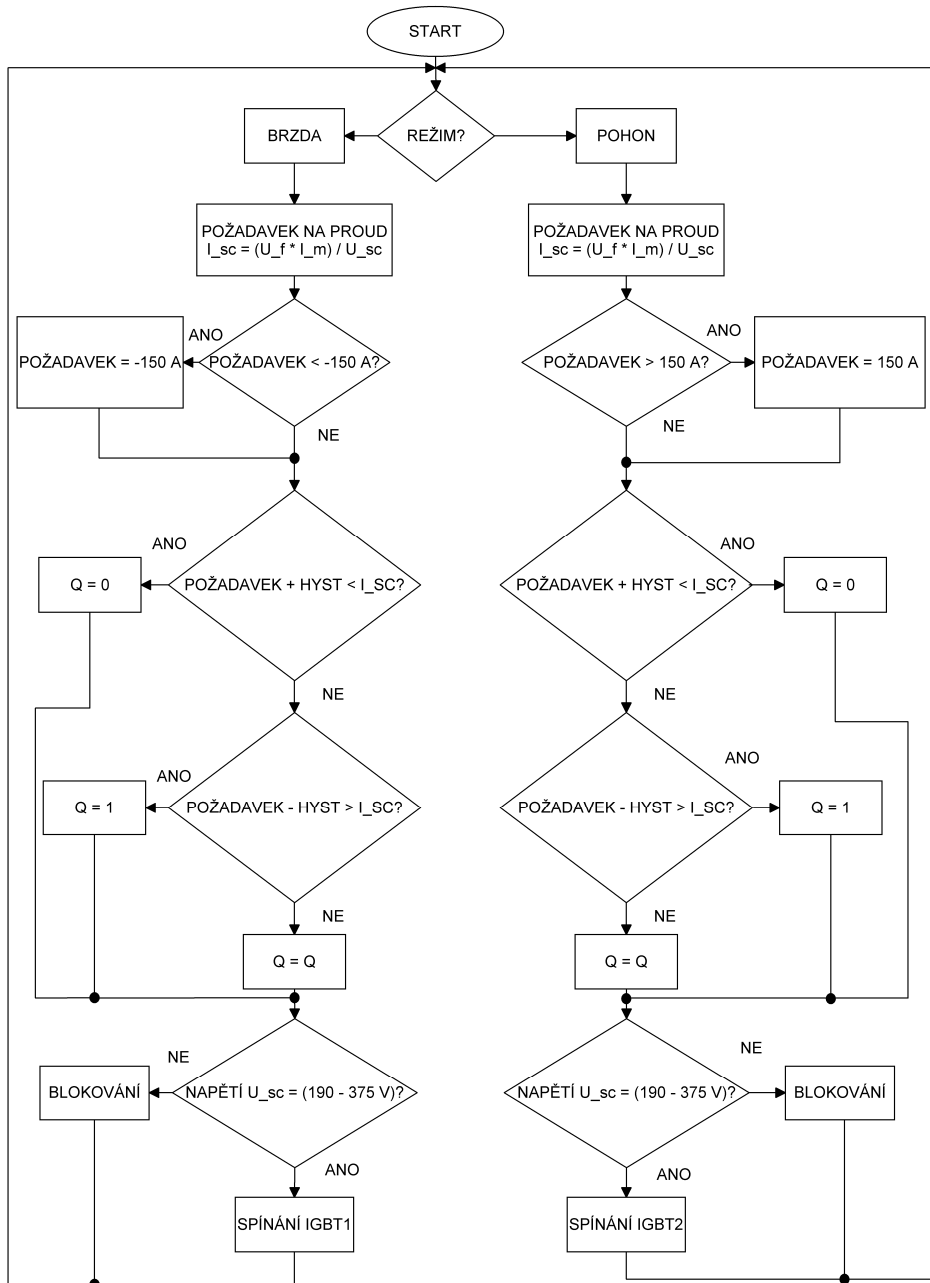
8

Vývojový diagram

V této kapitole jsou uvedeny vývojové diagramy na základě předchozí simulace chodu tramvaje (rozjezd, jízda a brzda. Na obr. 8.2 je zobrazen vývojový diagram zahrnující kompletní regulaci. Na obr. 8.1 je znázorněn vývojový diagram týkající se pouze regulace napětí v meziobvodu (napětí na U_{cf}).



Obr. 8.1: Vývojový diagram regulace napětí v meziobvodu



Obr. 8.2: Vývojový diagram kompletní regulace

9

Závěr

Cílem práce bylo vytvořit stručný přehled nejpoužívanějších akumulátorů v elektrických zařízeních. Konkrétně se jedná o akumulátory: olovněné otevřené a uzavřené, nikl-kadmiové, nikl-metalhydridové, lithium-iontové, lithium-polymerové a alkalické. Dále je v práci stručně vysvětlena funkce setrvačnicku a na příkladu uveden způsob jeho zapojení se spalovacím motorem. V další části je uveden podrobný popis struktury, funkce a parametrů superkapacitoru, který je následně využit v simulaci chodu tramvaje. V následující kapitole je detailně vysvětlen princip funkce pulzního měniče, který slouží k přenosu energie ze silového obvodu do kapacitoru a naopak. Dále je sestaveno obvodové schéma tramvaje a následně provedena simulace tramvajového chodu (rozjezd, jízda, brzda).

Simulace bude provedena v prostředí Matlab (Simulink, Plecs). Všechny průběhy vychází ze stejného požadovaného proudu do trakčního měniče.

Z obr. A.2 a A.4 je patrné, jaký vliv má superkapacitor na odběr proudu z troleje. V zapojení bez superkapacitorů (obr. A.4) je patrné, že proud požadovaný motorem je při rozjezdu prakticky totožný s odběrem proudu z troleje. K žádné úspoře energie tedy nedochází.

Na obr. A.2 jsou vykresleny hodnoty proudů a napětí se zapojeným superkapacitorem. V tomto případě je proud tekoucí superkapacitorem omezen na 150 A, což je maximální provozní hodnota proudu na zvoleném superkapacitoru. Z této charakteristiky je patrné, že superkapacitor se nestačí vybit na minimální hodnotu napětí, která je nastavena na 195 V a ani nabít na maximální hodnotu napětí, která je nastavena na 375 V.

Ukázka funkce regulace maximálního a minimálního napětí na superkapacitoru je na obr. A.3, kdy proud superkapacitoru dosahuje hodnoty 500 A. Tato hodnota proudu byla zvolena pouze z důvodu simulace správné funkce omezovače napětí na superkapacitoru. Z porovnání těchto průběhů vzejde, jak se míra nabití kondenzátoru projeví na velikosti uspořené proudu tekoucího z troleje. Plně nabitý superkapacitor je schopný zastoupit trolej až na cca 3 vteřiny.

Na obr. A.2 a A.3 je i znázorněna funkce vybíjecího odporu R_b . V meziobvodu je sledována velikost napětí. V režimu brzda se toto napětí zvýší a je pomocí dvouhodnotového řízení udržováno mezi 850 a 900 V. Po dosažení hodnoty 900 V je sepnut IGBT

tranzistor a připojen brzdový odporník, na němž je mařena zbylá energie.

V práci jsou uvedeny zjednodušené vývojové diagramy, které slouží jako podklady pro implementaci do procesorového řízení. Tyto diagramy byly vytvořeny na základě předchozí simulace. Konkrétně se jedná o vývojové diagramy regulace napětí v meziobvodu a kompletní regulace.

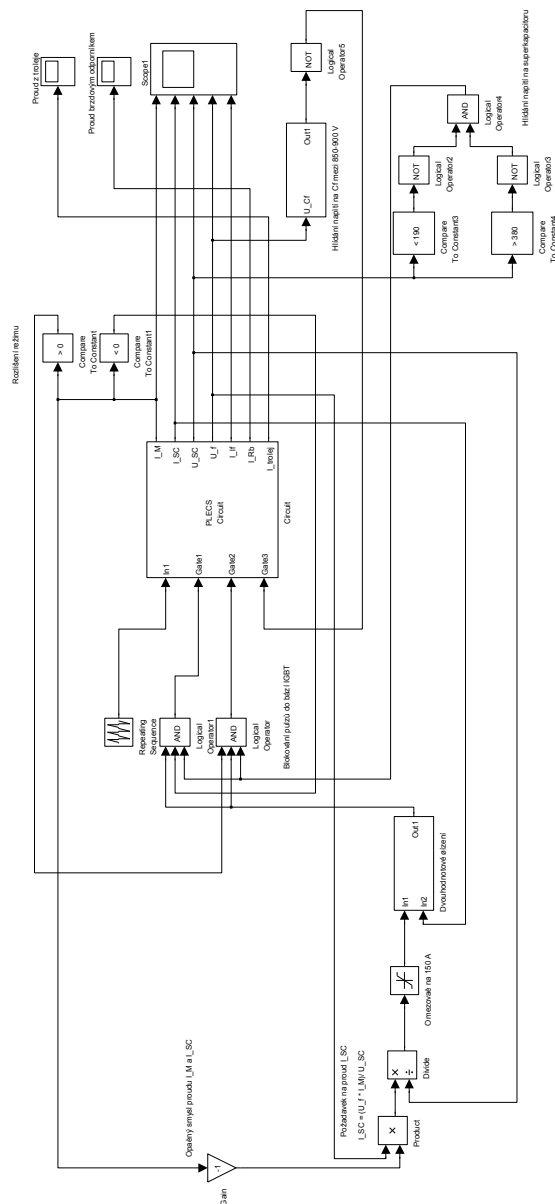
Literatura

- [1] *Alkalické akumulátory (RAM)*. [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://www.bucek.name/stranky/popisy/alkalicke_akumulatory/alkalicke_akumulatory.htm
- [2] *Akumulátory*. [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/sikovneruce/akumulator.htm>
- [3] *Abeceda baterií a akumulátorů*. [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory/princip>
- [4] *Li-Pol akumulátory*. [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>
- [5] *Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení*. [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [6] *Naše tramvaje a trolejbusy jsou stále úspornější*. [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: <http://www.pmdp.cz/zabava/zajimavosti/nase-tramvaje-a-trolejbusy-jsou-stale-uspornejsi.aspx>
- [7] ELSTNER, Vlastislav. *Zvýšení účinnosti rekuperace na tramvajové trati*. Plzeň. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/508/elsner.pdf;jsessionid=C37F75B17EAA0B5DD549169E94E135C8?sequence=1>
- [8] PAVELKA, Vladek. *Rekuperační systém se superkondenzátorem*. Praha, 2003. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap4_RSSS.pdf
- [9] NEUMAN, Tomáš. *Akumulace energie*. Brno, 2009. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6520/Moje%20bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>
- [10] <http://automatizace.hw.cz/>

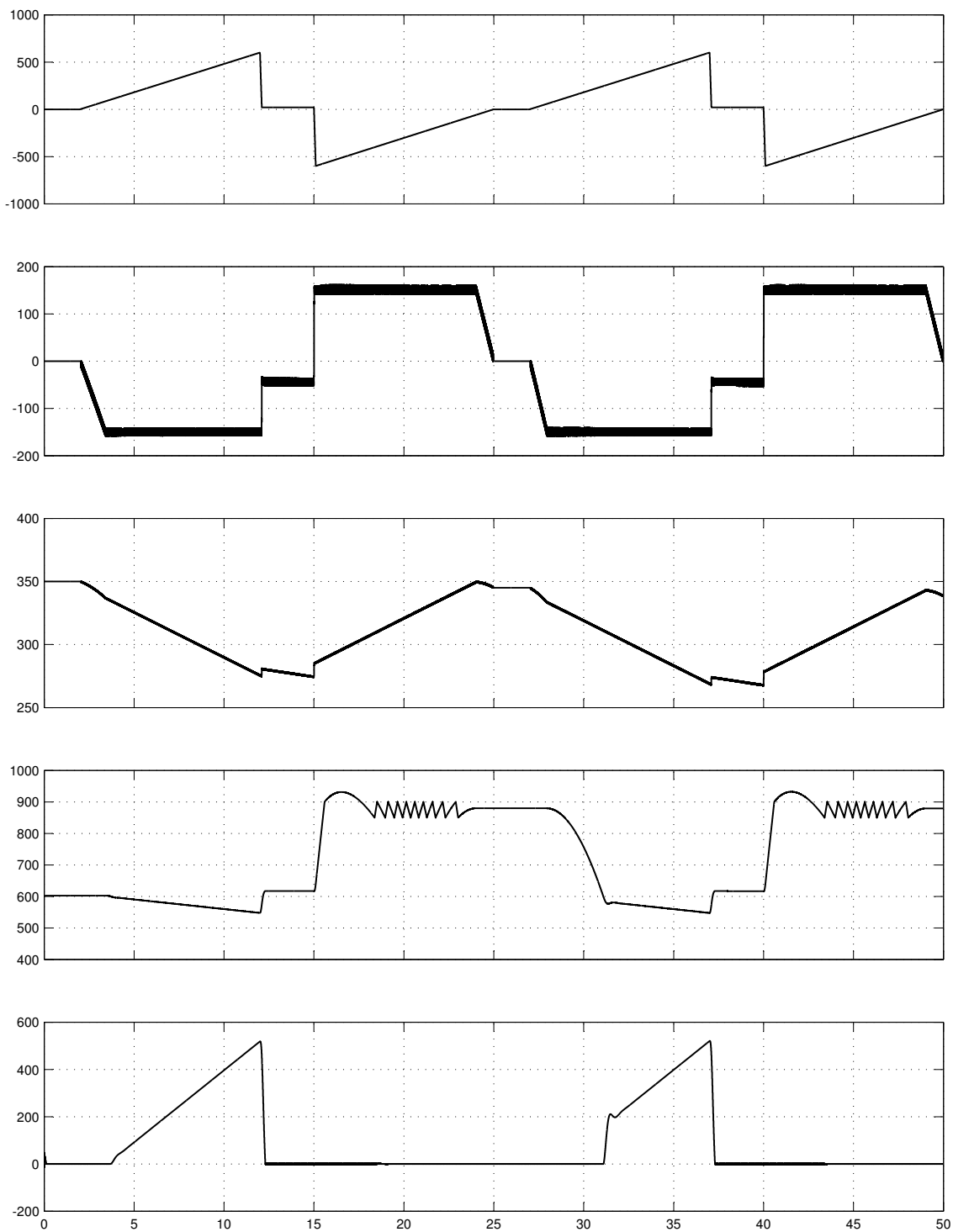
- [11] Maxwell Technologies. *125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE* [online]. 2013. [Cit. 10. 6. 2015]. Dostupné z: http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf

Příloha A

Simulace

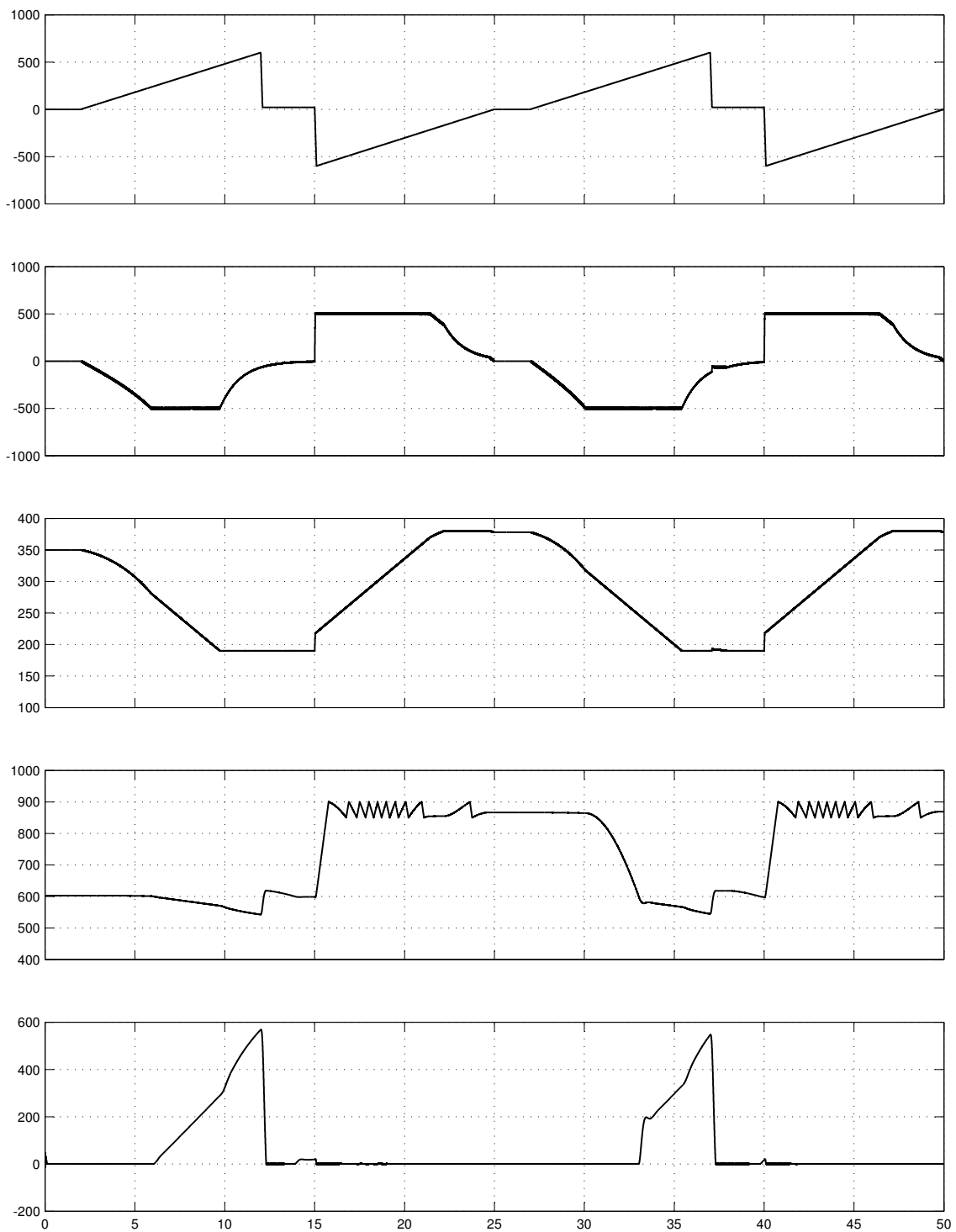


Obr. A.1: Schéma simulace



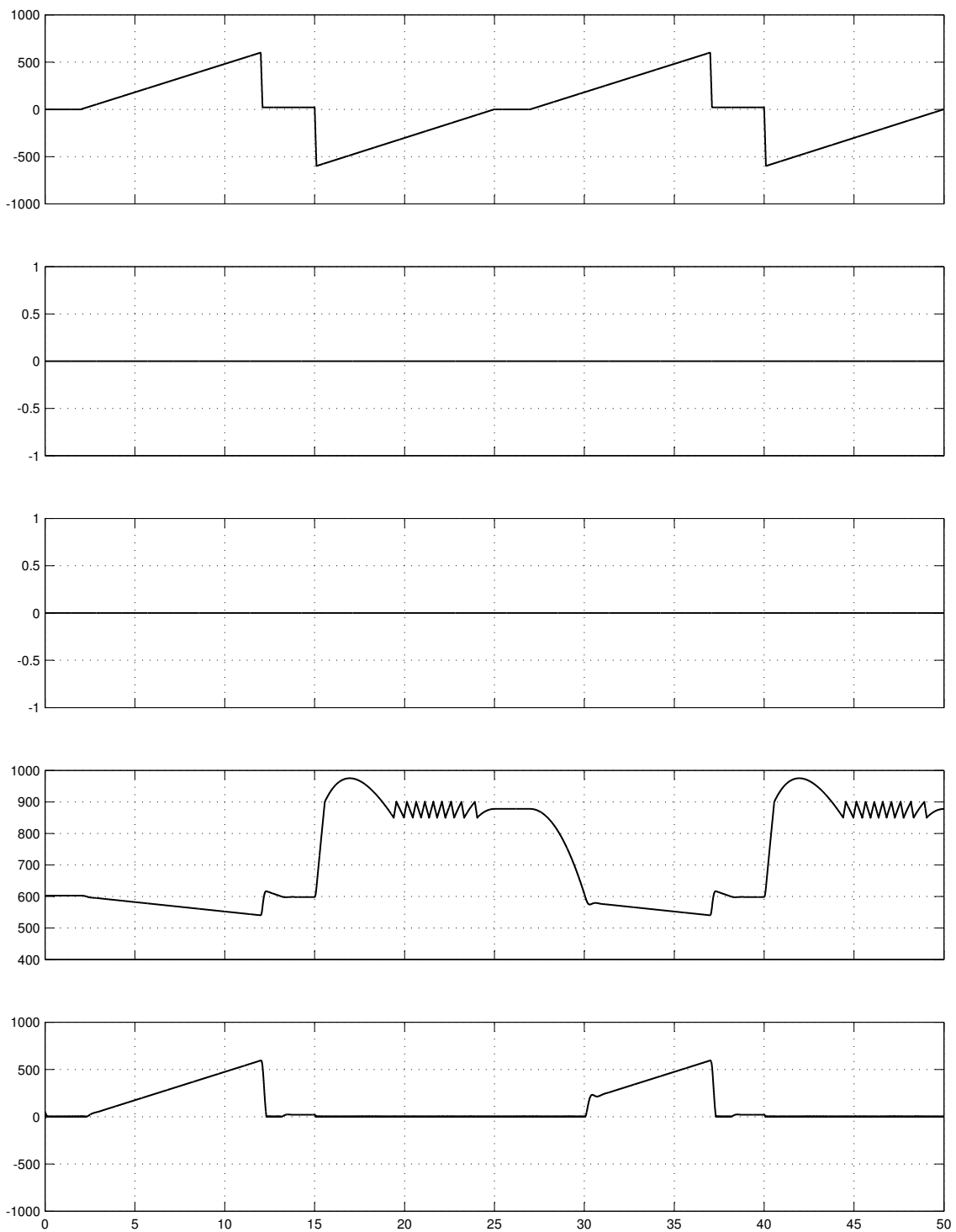
Time offset: 0

Obr. A.2: Průběhy proudů a napětí při omezení proudu superkapacitorem na 150 A, shora: proud do trakčního měniče, proud superkapacitorem, napětí na superkapacitoru, napětí v meziobvodu (na Cf) a proud z troleje



Time offset: 0

Obr. A.3: Průběhy proudů a napětí při omezení proudu superkapacitorem na 500 A, shora: proud do trakčního měniče, proud superkapacitorem, napětí na superkapacitoru, napětí v meziobvodu (na Cf) a proud z troleje



Time offset: 0

Obr. A.4: Průběhy proudů a napětí v zapojení bez superkapacitoru, shora: proud do trakčního měniče, proud superkapacitorem, napětí na superkapacitoru, napětí v meziobvodu (na Cf) a proud z troleje