ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Systém akumulace elektrické energie pro elektrické pohony

Tomáš György **2014**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Anotace:

V předkládané bakalářské práci je obsažen souhrn akumulátorů elektrické energie vhodných pro aplikaci v průmyslové elektronice. Další partií je rozbor měničů, jež mohou zajišťovat práci superkondenzátoru jakožto akumulátoru elektrické energie. Dále je vypracován návrh aplikace superkondenzátoru v automobilu a provozu tramvaje vybavené superkondenzátory. Poslední kapitolou je simulace tramvaje s kapacitory.

Klíčová slova

Akumulace
Elektrická energie
Energie
Zdroj
Pohon
Výkon
Regulace

Abstract:

The bachelor's theses contain summary of electric accumulators for application in power electronic. Next part is the analysis of converters, which are required to function of supercapacitor like accumulator of electric energy. Next is supercapacitor applications in the car and a draft operating trams equipped with supercapacitors. The last part is the simulation trams with capacitors.

Key words

accumulation
electrical energy
energy
source
drive
performance
regulation

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 25.8.2014 Tomáš György

……..

(Nepovinná část)

Poděkování

.

Obsah:

ÚVOD **1**

1 AKUMULÁTOR **2**

1.1 ROZDĚLENÍ AKUMULÁTORŮ 2
1.2 AKUMULÁTOR OLOVĚNÝ OTEVŘENÝ 4
1.3 AKUMULÁTOR OLOVĚNÝ UZAVŘENÝ 5
1.4 AKUMULÁTOR NIKL-KADMIOVÝ 6
1.5 AKUMULÁTOR NIKL-METALHYDIDOVÝ 8
1.6 LITHIUM-IONTOVÝ AKUMULÁTOR 8
1.7 LITHIUM-POLYMEROVÝ AKUMULÁTOR 10
1.8 ALKALICKÉ AKUMULÁTORY 11

2 SETRVAČNÍK **11**

2.1 ZAPOJENÍ SETRVAČNÍKU SE SPALOVACÍM MOTOREM 13

3 SUPERKAPACITOR **13**

4 MĚNIČE NAPĚTÍ PRO SUPERKAPACITOR **15**

4.1 REŽIM PRÁCE MĚNIČE 16
4.1.1 Snižovací měnič napětí *17*
4.1.2 Zvyšovací měnič napětí *18*
4.2 ŘÍZENÍ REKUPERAČNÍHO MĚNIČE 19
4.2.1 Regulátor napětí *20*
4.2.2 Regulátor proudu *21*
4.3 PŘEPĚŤOVÝ OBVOD MĚNIČE 21

5 ZAŘÍZENÍ EPOS **21**

6 NÁVRH HYBRIDNÍHO POHONU AUTOMOBILU **23**

7 NÁVRH ZAPOJENÍ SUPERKAPACITORU PRO ELEKTRICKOU TRAKCI **24**

8 SIMULACE CHODU TRAMVAJE S KAPACITORY **25**

8.1 ÚVOD 25
8.2 POPIS PRVKŮ MODELU 25
8.3 PRŮBĚH SIMULACE 27
8.4 VYHODNOCENÍ 28

9 ZÁVĚR **29**

10 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ **29**

Seznam obrázků:

OBRÁZEK 1.1 : *VNITŘNÍ STRUKTURA OTEVŘENÉHO OLOVNĚNÉHO AKUMULÁTORU PŘEVZATO Z [10]*.....4
OBRÁZEK 1.2 : *KONSTRUKCE NICD AKUMULÁTORU KNOFLÍKOVÉHO TVARU PŘEVZATO Z [3]*.....7
OBRÁZEK 1.3 : *KONSTRUKCE NICD AKUMULÁTORU VÁLCOVÉHO TVARU PŘEVZATO Z [3]*.....8
OBRÁZEK 1.4 : *VNITŘNÍ STRUKTURA ALKALICKÉ BATERIE PŘEVZATO Z [10]*.....11
OBRÁZEK 2.1 : *SETRVAČNÍK PŘEVZATO Z [9]*.....12
OBRÁZEK 2.2 : *SCHÉMA NÁVRHU ZAPOJENÍ SETRVAČNÍKU SE SPALOVACÍM MOTOREM PŘEVZATO Z [9]*.....13
OBRÁZEK 3.1 *VNITŘNÍ STRUKTURA SUPERKAPACITORU A ELEKTROLYTICKÉHO KONDENZÁTORU PŘEVZATO Z [10]*.....13
OBRÁZEK 4.1 : *SCHÉMA REKUPERAČNÍHO OBVODU MĚNIČE PŘEVZATO Z [8]*.....16
OBRÁZEK 4.2 : *SCHÉMA SNIŽOVACÍHO MĚNIČE PŘEVZATO Z [8]*.....17
OBRÁZEK 4.3 : *ZÁVISLOST ÚČINNOSTI, VÝKONU A PROUDU NA STŘÍDĚ SNIŽOVACÍHO MĚNIČE PŘEVZATO Z [8]*..18
OBRÁZEK 4.4 : *SCHÉMA ZVYŠOVACÍHO MĚNIČE PŘEVZATO Z [8]*.....18
OBRÁZEK 4.5 : *ZÁVISLOST ÚČINNOSTI, VÝKONU A PROUDU NA STŘÍDĚ ZVYŠOVACÍHO MĚNIČE PŘEVZATO Z [8]*.19
OBRÁZEK 4.6 : *SCHÉMA ŘÍZENÍ NAPĚŤOVÉHO MĚNIČE PŘEVZATO Z [8]*.....20
OBRÁZEK 5.1 : *MÍSTO APLIKACE ZAŘÍZENÍ EPOS V PLZNI PŘEVZATO Z [6]*.....22
OBRÁZEK 5.2 : *ENERGETICKÁ POSILOVACÍ STANICE EPOS PŘEVZATO Z [6]*.....23
OBRÁZEK 6.1 : *SCHÉMA HYBRIDNÍHO POHONU S VYUŽITÍM SUPERKAPACITORU U AUTOMOBILU*.....23
OBRÁZEK 7.1 : *SCHÉMA ZAPOJENÍ SUPERKONDENZÁTORU PRO ELEKTRICKOU TRAKCI PŘEVZATO Z [7]*.....24
OBRÁZEK 8.1 *SCHÉMA MODELU TRAMVAJE NAVRŽENÉHO PRO SIMULACI*.....25
OBRÁZEK 8.2 *PRŮBĚH PROUDU Z TROLEJE, PROUDU DO KAPACITORŮ A NAPĚTÍ NA KAPACITORECH*.....27

SEZNAM TABULEK:

TABULKA 1 : *SROVNÁNÍ PARAMETRŮ ELEKTROCHEMICKÉHO AKUMULÁTORU, SUPERKAPACITORU A BĚŽNÉHO KONDENZÁTORU [7]*.....15

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na přehled akumulátorů a princip jejich aplikace v praxi. V 1. části této práce je vypracované rozdělení nejvyužívanějších elektrochemických akumulátorů, princip jejich funkce, použití a parametry. Dále se v práci objevuje popis funkce setrvačníku, ukázka principu jeho sestavení a následné zapojení se spalovacím motorem. Poslední část přehledu akumulátorů se zabývá principem, využitím a parametry superkapacitoru. Dále je v práci vypracován podrobný popis funkce měniče a jeho řídícího systému potřebného pro funkčnost superkapacitoru v praxi. Pro uvedení použití superkapacitoru v praxi se v práci objevuje popis a význam funkce zařízení EPOS od firmy OHL ŽS. Dále je v práci zhotoven návrh hybridního pohonu automobilu a návrh zapojení superkondenzátoru pro elektrickou trakci. Na závěr práce je vypracovaná simulace tramvaje s kapacitory, do kterých se ukládá brzdná energie a následně se tato energie využívá při rozjezdu.

1 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 elektrické energie se převede na energii chemickou, v níž se uchová a následně zpět na elektrickou. V podstatě to funguje tak, že přivedení 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 dosáhli vyšších napětí.

1.1 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
- Lithium-iontový (Li-ion)
- Lithium-polymerový (Li-Pol)
- Lithium-železo-fosfátový akumulátor $LiFePO_4$ (Li-$FePO_4$)
- 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

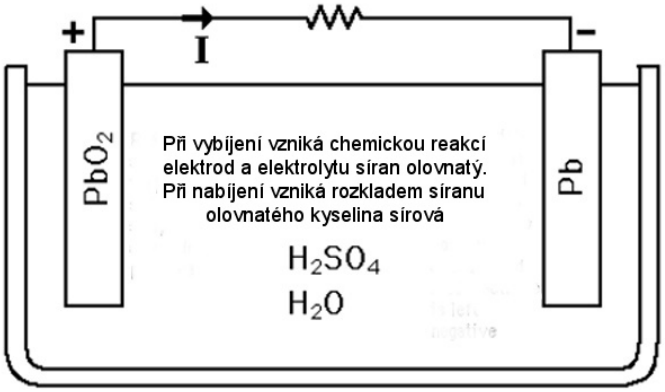
- válcové (tužkové)
  - ostatní válcové (A f, Cs, C, D, F, SF, N, …)
- prizmatické
  - malé prizmatické
- diskové (knoflíkové)
  - podle průměru (např. Ø 6,8 mm, Ø 11,5 mm, Ø 15,5 mm, Ø 25 mm, …)
  - oválné
- hranolovité (+ jejich sestavy)

Podle technologie výroby

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

1.2 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 houbovité 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 sýrová 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.



Obrázek 1.1 : *Vnitřní struktura otevřeného olovněného akumulátoru převzato z [10]*

U těchto akumulátoru 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 akumulátoru starších a opotřebovaných. Tyto typy baterií mají jako výhodu velmi dobrou účinnost, řádově se pohybující 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 ampérhodinami.

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 odběrů proudů sníží dodávaný proud i napětí akumulátorem. Sulfataci poznáme podle malých bílých lesklých skvrn na elektrodách. Sulfatace je závislá na teplotě a míře vybití akumulátoru. Při vyšší teplotě, což znamená 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 demontáží 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 kde nemůže dojít ke styku s otevřeným ohněm. Průměrná životnost těchto baterií bývá přibližně 350 nabíjecích cyklů, tedy přibližně 4-6 let, záleží však na míře používání a kvalitě údržby. Při vybití článku pod 1,75 V, baterie je nevratně poškozena.

1.3 Akumulátor olověný uzavřený

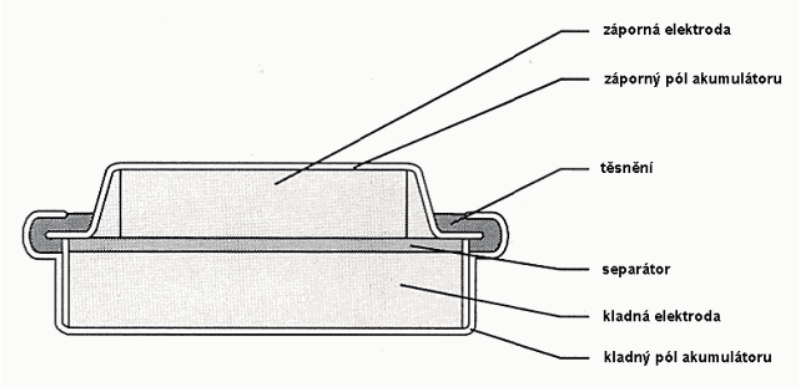
Uzavřený olověný akumulátor pracuje na stejném principu jako olověný otevřený, liší se vlastnostmi elektrolytu, který je v tomto případě gelové konzistence. Díky tomu neovlivňuje jeho funkci manipulace a je možné článek montovat v libovolné poloze, jsou však citlivé na vibrace, tvrdé otřesy, na přebíjení a hluboké vybíjení. Kvůli této vlastnosti je u tohoto akumulátoru třeba použít dobře seřízenou nabíjecí automatiku nebo omezit napětí nabíječe na požadované hodnoty, to znamená na takovou, aby na jeden článek připadalo napětí jen 2,3 V. Uveďme 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 dvanácti-voltový akumulátor při napětí 13.6 V. Při velkém přebití 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 ampérhodin. Mrazuvzdornost je u uzavřeného akumulátoru vyšší, než u otevřeného, kolem -60°C, životnost je přes 6 let.

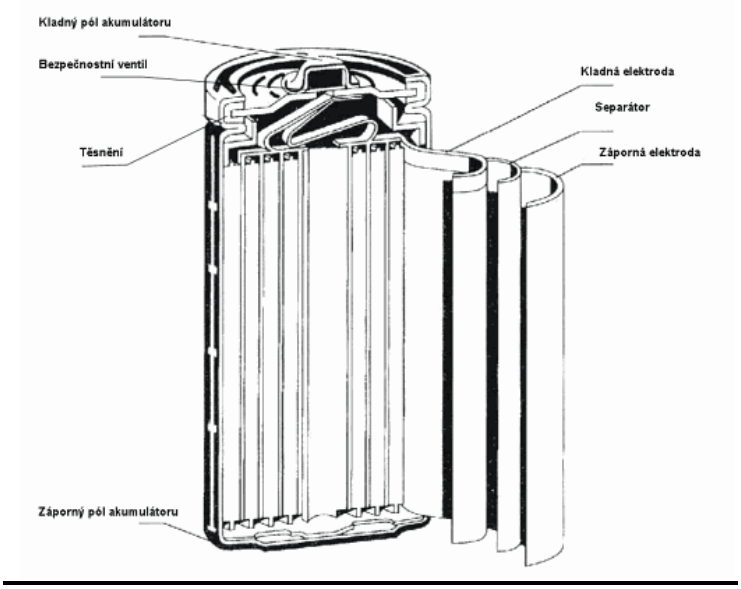
1.4 Akumulátor nikl-kadmiový

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 skladovat je 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 nikl-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.



Obrázek 1.2 : *Konstrukce NiCd akumulátoru knoflíkového tvaru převzato z [3]*



Obrázek 1.3 : *Konstrukce NiCd akumulátoru válcového tvaru převzato z [3]*

1.5 Akumulátor nikl-metalhydidový

Tato baterie je podobná baterii nikl-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 niklhydroxid 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 vůči životnímu prostředí a ve srovnání s nikl-kadmiovýmu bateriemi mají vyšší výkon i energetickou hustotu. Nevýhodou je však menší počet nabíjecích cyklů a častý výskyt paměťového efektu.

1.6 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 uhličitanů, například ethylen-uhličitanem. 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 článek 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 900mAh 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 nabité 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 (500-2 000 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

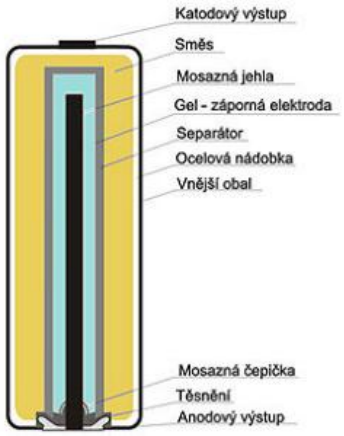
elektrická vozidla a letecký průmysl. Tyto baterie jsou stále běžnější náhrada za olověné baterie, které byly použity v minulosti u užitkových vozidel. Namísto těžkých olověných desek a kyseliny elektrolytu, se používají lehké Lithium-iontové baterie. Mohou poskytnout stejné napětí jako olověné baterie s menšími nároky na rozměry a s menším dopadem při případném poškození na životní prostředí.

1.7 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.

1.8 Alkalické akumulátory

Alkalické akumulátory, označované jako akumulátory RAM (Rechargeable Alkaline Manganese) jsou dne 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.



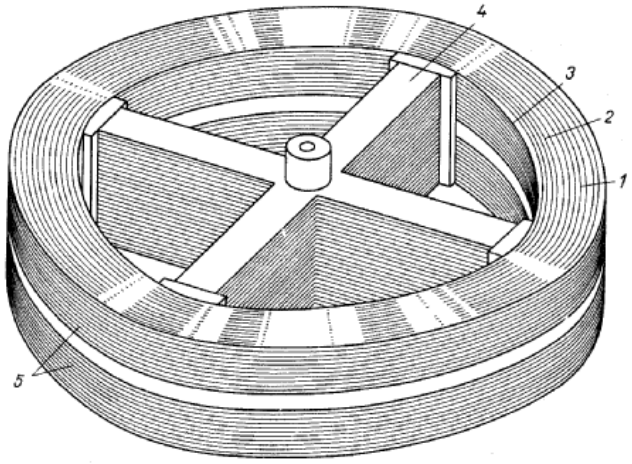
Obrázek 1.4 : *Vnitřní struktura alkalické baterie převzato z [10]*

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 1A.

2 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 3 500MPa a s hustotou 1,44 kg/dm^3. U ocelových setrvačníků je nevýhodou neúplné využití pevnosti materiálu. Největší mechanické napětí je na obvodu setrvačníku, což je způsobeno odstředivými silami. Tyto síly mohou při překročení meze pevnosti způsobit trhliny a následnou destrukci akumulátoru. Na obrázku 2.1 je nákres setrvačníku.

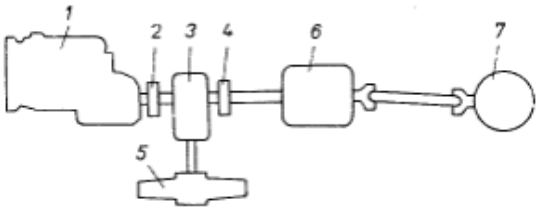


Obrázek 2.1 : *Setrvačník převzato z [9]*

Věnec setrvačníku je vinut z více vrstev. Vnější a střední vrstvy (1;2) jsou z kevlaru, vnitřní vrstva (3) je z fiberglassu, 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. Věnec setrvačníku se skládá ze dvou dílů (5). Pro snížení ztrát třením o vzduch se setrvačníky vkládají do vzduchotěsné skříně, ze které se vzduch vyčerpává. Setrvačník se před destrukcí chvějí vlivem nevyváženosti při uvolňování vláken, která se vklíní mezi samotný setrvačník a již zmíněnou vzduchovou skříň a tím se může poškodit. Hustota energie u setrvačníků bývá 45 W h/kg v běžném provozu. Na hranici destrukce dosahují hodnot 65 až 120 Wh/kg. Výhodné využití má setrvačníkový 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. Setrvačník je schopný okamžitě přijímat a vydávat velkou energie, což je dobře využitelné při akumulaci brzdné energie dopravního prostředku.

2.1 Zapojení setrvačníku se spalovacím motorem

Zapojení setrvačníku se spalovacím motorem je na obrázku 2.2.

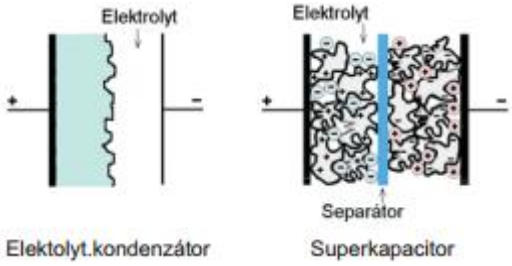


Obrázek 2.2 : *Schéma návrhu zapojení setrvačníku se spalovacím motorem převzato z [9]*

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

3 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.



Obrázek 3.1 *Vnitřní struktura superkapacitoru a elektrolytického kondenzátoru převzato z [10]*

Separační folie nebo - li 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 jemnozrnný 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 dvou-vrstvy 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 dvou-vrstva 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 zrnek uhlíku. Nevýhodou malých vzdáleností zrnek 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 uložená v těchto speciálně upravených kondenzátorech je řádově 10x větší, než v kondenzátorech běžných. Špičkové výkony dodané superkapacitorem jsou řádově v kW na 1 kg hmotnosti akumulátoru. Nevýhodou superkondenzátoru je, že uložená energie je menší než v klasických akumulátorech, avšak výhodou oproti nim je větší pohotovost, která je dána rychlejším dobíjením a vyšší životností.

	olověná baterie	superkondenzátor	běžný kondenzátor
nabíjecí doba	1 – 5 h	0,3 – 30 s	10^{-3} – 10^{-6} s
vybíjecí doba	0,3 – 3 h	0,3 – 30 s	10^{-3} – 10^{-6} s
měrná energie [Wh/kg]	10 - 100	1 – 10	< 0,1
měrný výkon [W/kg]	< 1000	< 10 000	<100 000
životnost [cyklů]	1000	> 500 000	> 500 000
účinnost nabíjení a vybíjení [%]	70 – 85	85 –98	> 95

Tabulka 1 : *Srovnání parametrů elektrochemického akumulátoru, superkapacitoru a běžného kondenzátoru [7]*

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 brzdné 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, což docílíme akumulací brzdné energie nebo jeho pozvolným nabitím.

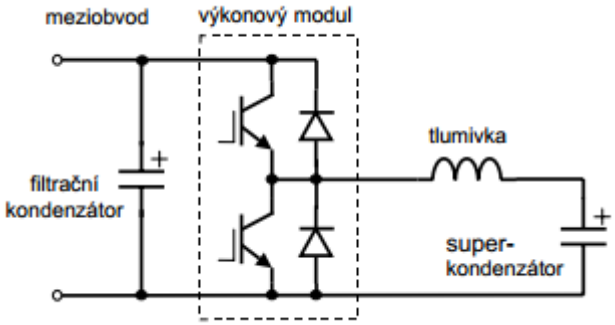
4 Měniče napětí pro superkapacitor

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.

4.1 Režim práce měniče

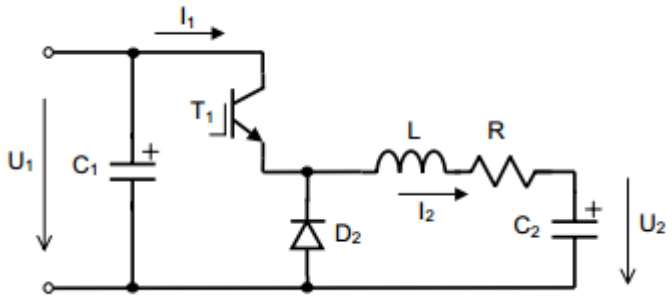
Nejpoužívanější metodou řízení těchto napěťových měničů je pulsně-šířková modulace (PWM). Charakteristickými hodnotami tohoto způsobu řízení je spínací frekvence f a perioda spínání T=1/f a střída řízení z, která je dána poměrem doby zapnutí spínacího prvku a periody spínání T. Rozlišujeme dva režimy 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 4.1.



Obrázek 4.1 : *Schéma rekuperačního obvodu měniče převzato z [8]*

V něm 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.

4.1.1 Snižovací měnič napětí



Obrázek 4.2 : *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.

a) 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 1. řádu:

$U_1 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_2$, ze které lze vyjádřit, že:

$i_2 = \frac{(U_1 - U_2)}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$, kde τ je časová konstanta obvodu $\tau = \frac{L}{R}$

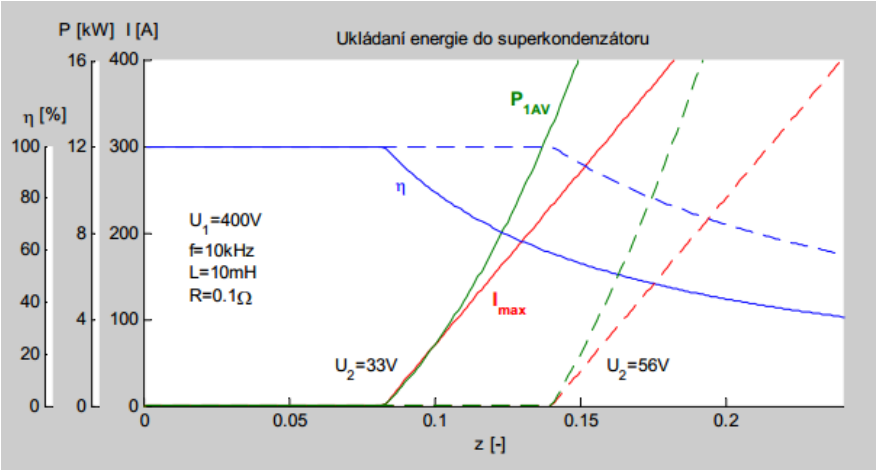
b) Vypnutý tranzistor T_1

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:

$0 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_2$,ze které:

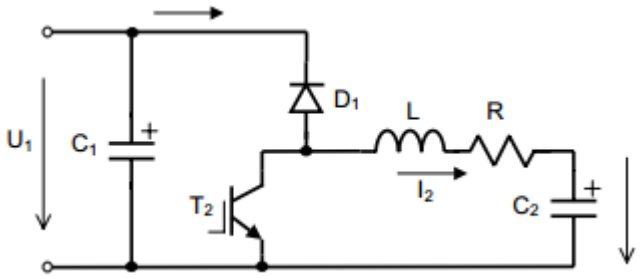
$i_2 = -\frac{U_2}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_H \cdot e^{\frac{t}{\tau}}$, kde I_H je maximální hodnota k hodnotě $-\frac{U_2}{R}$

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.



Obrázek 4.3 : *Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě snižovacího měniče převzato z [8]*

4.1.2 Zvyšovací měnič napětí



Obrázek 4.4 : *Schéma zvyšovacího měniče převzato z [8]*

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.

a) 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:

$U_2 = -R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt}$, z toho plyne:

$i_2 = -\frac{U_2}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_D \cdot e^{\frac{t}{\tau}}$, kde opačné znaménko u proudu napovídá, že proud je

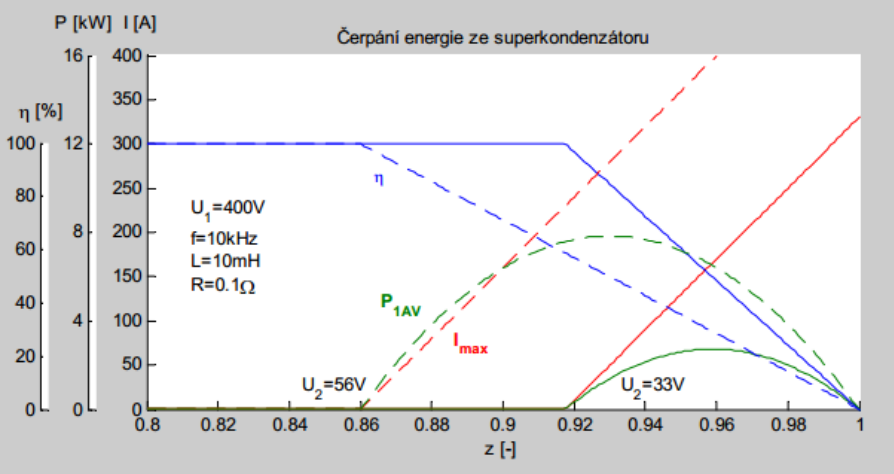
v opačném směru, než je zvolený směr ve schématu 4.4.

b) 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:

$U_2 = -R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_1$, jejímž řešením je proud klesající z počáteční maximální hodnoty I_H k hodnotě $\frac{U_1 - U_2}{R}$

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



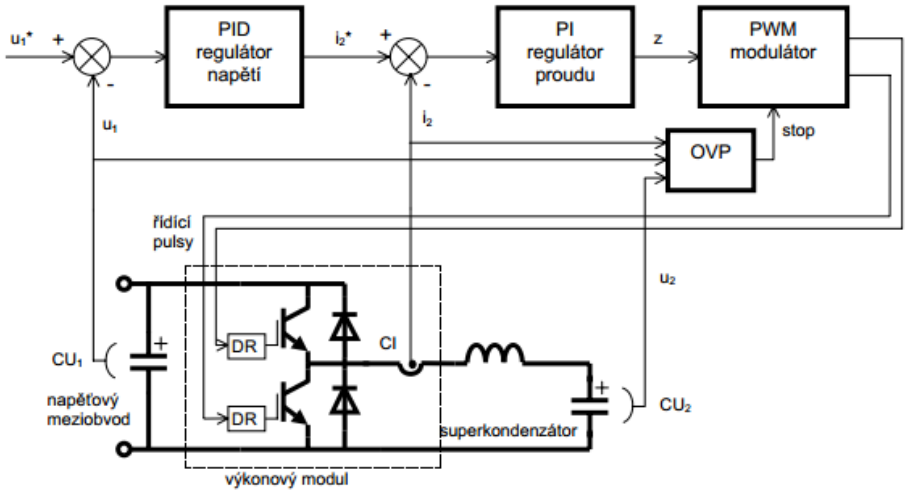
Obrázek 4.5 : *Závislost účinnosti, výkonu a proudu na střídě zvyšovacího měniče převzato z [8]*

4.2 Řízení rekuperačního měniče

Pro správnou funkčnost již zmíněného rekuperačního měniče je třeba sestavit řídící obvod, který bude nastavovat a udržovat požadované hodnoty napětí v meziobvodu a zároveň

požadovaný stav nabití superkondenzátoru. Z rovnice $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_i^2$ [J,F,V] 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.

Regulační schéma



Obrázek 4.6 : *Schéma řízení napěťového měniče převzato z [8]*

Na obrázku 4.6 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 řídící pulsy pro výkonové spínací prvky měniče. Blok OVP (Over Value Protection) blokuje řídící impulsy, překročí-li měřené veličiny povolenou mez.

4.2.1 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: $I_{2AV(Pmax)} = \frac{-U_2}{2 \cdot R}$

4.2.2 Regulátor proudu

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

4.3 Přepěťový obvod měniče

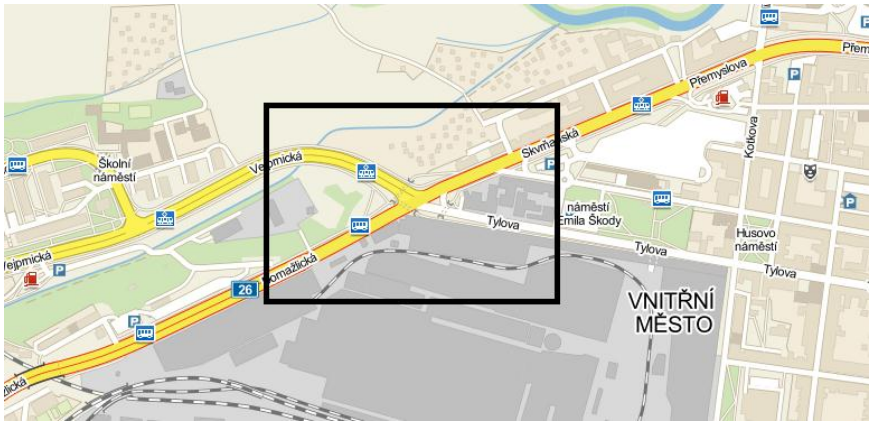
Přepěťový obvod měniče plní ochrannou funkci meziobvodu a k němu připojených zařízení, tedy měničů. Tento ochranný obvod je potřebný v situaci, kdy energie dodávaná do meziobvodu není současně odváděna. Tento děj způsobí velký nárůst napětí. Tento nárůst bývá kvůli malé kapacitě filtračních kondenzátorů 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 brzdného 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.

5 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 nebyli 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 následné její využití při rozjezdu. Plné využití rekuperace bylo omezeno vlastností měníren, které nebyly schopny vracet tuto energie 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 (Obrázek 5.1). Dosud bylo napájení obou trakcí odděleno a trolejbusová trať navíc trpěla nedostatečným napájením, což způsobovalo velké ztráty a občasné výpadky.



Obrázek 5.1 : *Místo aplikace zařízení EPOS v Plzni převzato z [6]*

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 měnírny. 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.

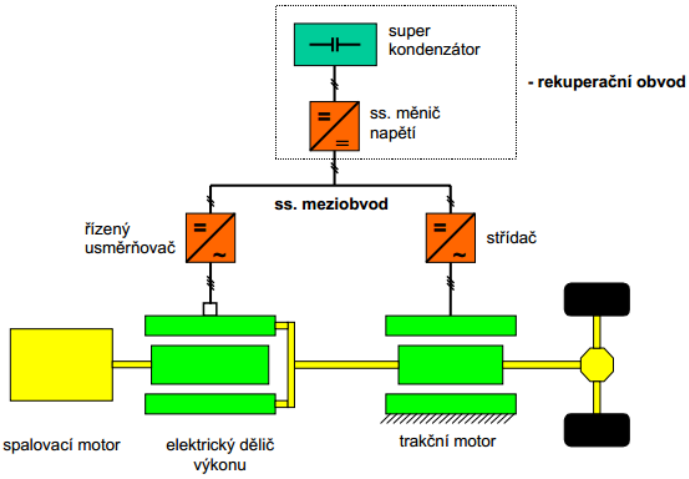
Obrázek 5.2 : *Energetická posilovací stanice EPOS převzato z [6]*

Využití superkapacitoru v samotném dopravním prostředku je též v začátcích. Prvním trolejbusem s touto vlastností je trolejbus Trollino, jezdící v estronském 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%. S pomocí zařízení EPOS, tedy inteligentním napájením a využitím superkapacitorů lze zvýšit množství uspořené energie o dalších 22%.

6 Návrh hybridního pohonu automobilu

Blokové schéma hybridního pohonu s využitím superkapacitoru je na obrázku 6.1.

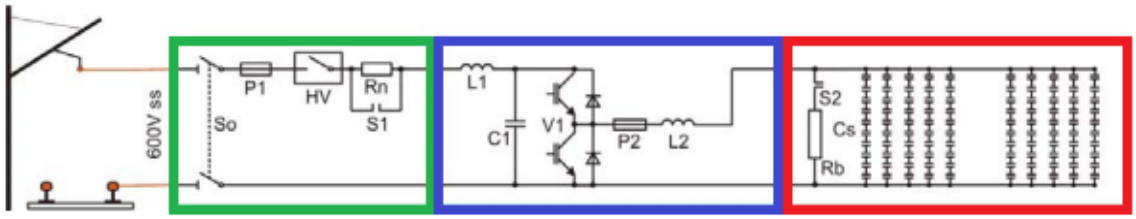


Obrázek 6.1 : *Schéma hybridního pohonu s využitím superkapacitoru u automobilu*

Elektrickým děličem výkonu je myšleno synchronní generátor s permanentními magnety a otočným statorem a rotorem. Naindukované napětí na jeho svorkách se rovná rozdílu otáček statoru a rotoru, v našem případě rozdílem otáček spalovacího motoru a kol vozidla. Toto napětí se přivádí do stejnosměrného meziobvodu usměrňovačem, z něj pak přes střídač do trakčního motoru. Usměrnění provádíme kvůli možnosti akumulace energie do superkapacitoru přes měnič napětí. Výsledný hnací moment kol se rovná součtu hnacího momentu od děliče až do trakčního motoru. Meziobvod je jakýmsi prostředníkem mezi akumulátorem energie a pohonem vozidla. Akumulátorem energie, jak bylo již vysvětleno v kapitole 3., je nejvýhodnější zvolit superkapacitor, který má velmi dobré dynamické vlastnosti, kdežto akumulátor elektrochemický má v tomto případě tu nevýhodu, že jeho dobíjení musí být postupné, aby se nesnižovala jeho účinnost. Rekuperační obvod slouží k optimalizaci napětí na superkapacitoru a v meziobvodu.

7 Návrh zapojení superkapacitoru pro elektrickou trakci

Na obrázku 7.1 je zobrazen návrh aplikace superkondenzátoru pro elektickou trakci.



Obrázek 7.1 : *Schéma zapojení superkondenzátoru pro elektrickou trakci převzato z [7]*

So – Odpojovač akumulátoru
P1 – Hlavní pojistka silových obvodů
HV – Hlavní vypínač – stejnosměrný rychlovypínač
Rn – Nabíjecí odpor
S1 – Provozní stykač k přemostění Rn
L1 – Tlumivka filtru
C1 – Kapacitor filtru
V1 – Měnič napětí – blok IGBT tranzistorů a diod
P2 – Ochranná pojistka
L2 – Tlumivka pro zvyšovací chod měniče
S2 – Stykač nouzového vybíjení kondenzátorové baterie
Rb – Vybíjecí odporník pro nouzové vybití
Cs – Sada superkondenzátorů

Zapojení je rozděleno do 3 bloků.

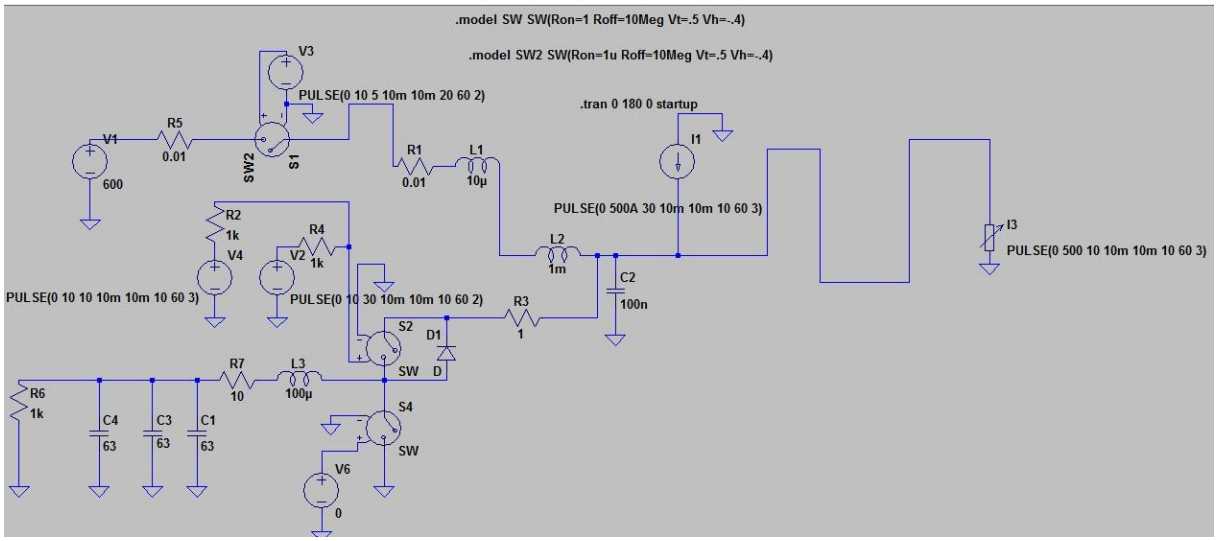
Zelená část představuje vstupní obvody s elektrickými přístroji. Jedná se hlavně o přístroje bezpečnostní, které v případě poruchy zabrání poškození dalších částí zapojení a jejich případné odpojení. Modrá část obsahuje měnič, který je detailně probrán v kapitole 4.

Červená část zapojení obsahuje samotný superkapacitor s nouzovými elektrickými přístroji. Tyto přístroje, jakými jsou vybíjecí odporník pro nouzové vybíjení a k němu sériové zapojený stykač chrání superkapacitor před poškozením přetížením vysokým napětím.

8 Simulace chodu tramvaje s kapacitory

8.1 Úvod

Simulace chodu tramvaje byla provedena v programu LT Spice IV. Tento program byl zvolen z důvodu největší výhodnosti jeho použití k danému problému. Jedná se o simulaci rozjezdu, jízdy bez pohonu a následného brždění tramvaje s použitím tří superkapacitorů. Tato simulace je značně idealizovaná a může se od praktické reality v některých bodech lišit.
Schéma modelu tramvaje vytvořeného pro danou simulaci je na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 *Schéma modelu tramvaje navrženého pro simulaci*

8.2 Popis prvků modelu

V1 představuje zdroj napětí troleje, ze které tramvaj čerpá energii. Prvek SW2 je v podstatě

spínač řízený napětím. Tento spínač rozhoduje o tom, zda energii do tramvaje dodává trolej či kapacitory. R1 je odpor vedení a L1 je indukčnost vedení. Spínače S2 a S4 jsou v tomto návrhu náhradou tranzistorů, jejichž funkce je určující pro chování dopravního prostředku. Stav, ve kterém se tramvaj nachází, ať jde o akceleraci či brzdu, určuje směr proudu mezi kapacitory a motorem. Tyto spínače získávají spínací impulsy z napěťových zdrojů V2, V4 a V6. Odpor R7 prezentuje tzv. ESR kondenzátorů, což je zkratka pro ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru. Nevýhodou superkapacitorů je jejich velké samovybíjení. Hodnota samovybíjení je závislá na teplotě a samozřejmě době, kdy není superkapacitor používán. Kvůli těmto podmínkám je odhad této hodnoty velmi složitý. Odpor, který toto samovybíjení vyvolává jsem zvolil 1kΩ. C1, C3 a C4 jsou superkapacitory s kapacitou 63F/125V, které mají vnitřní odpor 18 mΩ. Prvky I1 a I3 jsou v tomto modelu proudové zdroje. Proudový zdroj I1 v simulaci zastupuje energii, která vzniká brzděním a přechází do kapacitorů. V reálném modelu bývá této energie více, než jsou kapacitory schopné uložit. Tento přebytek se poté vrací rekuperací zpět do sítě. Proudový zdroj I3 je zde aplikován jako spotřebič pro účely simulace. Tento návrh simulace je možné libovolně rozšířit např. jiným dynamickým chováním motoru či nahrazením některých součástek reálnějším modelem.

8.3 Průběh simulace

Obrázek 8.2 *Průběh proudu z troleje, proudu do kapacitorů a napětí na kapacitorech*

Rozjezd tramvaje začíná po deseti vteřinách simulace. Na počátku je velikost napětí na kapacitorech nulová a odběr proudu z troleje také nulový. Jakmile se začne dopravní prostředek rozjíždět, skočí hodnota proudu odebíraného z troleje na přibližně 550 A. Tento proud je trolejí dodáván po celou dobu deseti – vteřinového rozjezdu. Během tohoto stavu se mírně nabíjí a kapacitory, do kterých přechází přebytečných 50 A z troleje. Stav tramvaje poté přejde z rozjezdu do setrvačného chodu, kdy se pohybuje bez odběru proudu. Tento stav trvá také 10 vteřin. Následně začne tramvaj brzdit. To způsobí přenos energie do kapacitorů a následně její uložení. Po konci tohoto cyklu, je úroveň nabití kapacitorů přibližně 29 V. Následuje třiceti - sekundová pauza, než začne stejný cyklus znovu. Další, opakující se cyklus však navýší napětí na kapacitorech tak, že je možno kapacitory při dalším rozjezdu již využít, tedy přibližně 58 V. Při rozjezdu se proud již neodebírá z troleje, nýbrž pouze z kapacitorů. Napětí na kapacitorech klesne z 58 V na 32 V. Následné brzdění způsobí, že vzniklá energie se rozdělí. Část energie se rekuperací vrací do sítě a zbytek nabíjí kapacitory. Při delší pauze se u superkapacitorů projeví efekt samovybíjení a tudíž se jejich velikost nabití sníží.

8.4 Vyhodnocení

Použití superkapacitorů v praxi je vhodné především pro velmi hustý městský provoz s velkou četností rozjezdů a brzdění při relativně nízkých rychlostech. Tato myšlenka úspory energie a má své výhody i nevýhody. Nevýhodou využívání těchto kapacitorů je jejich vysoká pořizovací cena, přesahující až 100 000 Kč. K této ceně je také třeba připočítat cenu DC/DC převodníku, který je nezbytnou součástí pro zapojení s těmito kapacitory. Životnost těchto článků udává výrobce zhruba kolem milionu nabíjecích a vybíjecích cyklů. Hrubý odhad, který je proveden u tramvajové linky č. 4 v Plzni říká, že počet milionu cyklů, by měl být naplněn po minimálně pěti letech svého plného využití. Poté je třeba superkapacitory vyměnit. Ušetřený výkon elektrické energie odebírané z troleje je v řádech až desítek MWh ročně, záleží opět na intenzitě používání dopravního prostředku a jeho spotřebě elektrické energie. Cena elektrické energie, kterou platí provozovatelé městské hromadné dopravy za 1Wh dodavateli není známá a obě strany tuto cenu z obchodních důvodů tají. Závisí tedy na mnoha aspektech, zda se využití této technologie v praxi vyplatí. Úlevou bude tato aplikace i pro životní prostředí, hlavně tedy v hybridních vozidlech se spalovacím motorem.

9 Závěr

Z předkládané práce vyplývá, na jakých principech akumulátory fungují, jakými dobrými vlastnostmi akumulátory disponují, jsou zde zmíněny i jejich parametry a možné nevýhody. Z práce by mělo vzejít, jaký akumulátor je dobrý v konkrétních případech v praxi. To samé platí i pro setrvačník, jehož rozbor je následně doplněn i o způsob zapojení se spalovacím motorem. Z popisu vlastností superkapacitoru jasně vyplývá, že jeho aplikace do hybridních pohonů je velkým příslibem do budoucnosti. Jeho vlastnosti napovídají, že je z oblasti elektrických akumulátoru nejvýhodnějším prvkem pro využití úschovy energie v automobilech a elektrických trakcích. Jsou zde podrobně popsány postupy, jakými se tyto superkondenzátory do těchto dopravních prostředků zapojují a jakým způsobem je řízena jejich funkce. Níže jsou uvedeny konkrétní příklady zapojení superkapacitorů do hybridního pohonu automobilu nebo elektrické trakce, jakou je například tramvaj. Je třeba se zmínit i o zařízení EPOS, které superkapacitory též využívá. Z rozboru tohoto zařízení jasně plyne, jakou měrou je schopno šetřit energie a tím i finance a kde je nejvýhodnější ho aplikovat. V poslední kapitole práce je provedena simulace chodu tramvaje. Tato kapitola obsahuje schéma zapojení tramvaje s kapacitory a následně je na průběhu vyobrazeno chování tohoto modelu a vyhodnocení jeho platnosti v praxi. Je třeba zmínit, že výhodnost toho zapojení musí zvážit zřizovatel na základně mnoha aspektů, které ovlivňují, zda se kapacitory v tramvaji vyplatí, či ne.

10 Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] Alkalické akumulátory (RAM). *Bucek.name* [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://www.bucek.name/stranky/popisy/alkalicke_akumulatory/alkalicke_akumulatory.htm

[2] Akumulátory. *Mve.energetika.cz* [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://mve.energetika.cz/sikovneruce/akumulator.htm

[3] Abeceda baterií a akumulátorů. *Battex.info* [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory/princip

[4] Li-Pol akumulátory. PAVLIS, Jakub. *Notebook.cz* [online]. 2011, 22. 6. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory

[5] Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. BELZA, Jaroslav. Belza.cz [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://www.belza.cz/charge/liion1.htm

[6] Naše tramvaje a trolejbusy jsou stále úspornější. Pmdp.cz [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 superkondnzátorem. Praha, 2003. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap4_RSSS.pdf. FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.

[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. Bakalářská práce. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.

[10] Http://automatizace.hw.cz/ [online]. [cit. 2013-07-11]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/