

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Systémy akumulace elektrické energie ve výkonové elektronice

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan MARYT**
Osobní číslo: **E11N0165P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Systémy akumulace elektrické energie ve výkonové elektronice**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte stručný přehled možností akumulace elektrické energie.
2. Pro variantu s použitím superkondenzátoru sestavte obvodové schéma (měnič, zdroj energie, superkondenzátor, 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: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Konzultant diplomové práce:

Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky


Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013




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

L.S.


 Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
 vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

V předkládané diplomové 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 vypracována simulace provozu tramvaje vybavené superkondenzátory. Na závěr jsou uvedeny základní podmínky bezpečnou práci superkondenzátoru.

Klíčová slova

Sekundární články, setrvačnický, superkondenzátor, pseudokapacitor, měniče, Simulink, řízení

Abstract

The master 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 simulation of the tram equipped with supercapacitors. Finally theses contain the basic conditions for safety work of supercapacitor.

Key words

Secondary batteries, flywheel, supercapacitor, pseudokapacitor, converters, Simulink, control

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne

Jan Maryt

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat panu Doc. Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky poskytnuté při tvorbě této diplomové práce a za vstřícný přístup ke konzultacím. Bez jeho pomoci by tato práce nevznikla.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	11
1. AKUMULÁTORY ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	12
1.1. SEKUNDÁRNÍ ČLÁNKY	12
1.1.1. Olověné články.....	13
1.1.2. Ni-Cd akumulátory.....	14
1.1.3. Ni-Fe akumulátory	16
1.1.4. Ni-MH akumulátory	16
1.1.5. Li-Ion akumulátory.....	17
1.1.6. LFP akumulátory	19
1.2. SETRVAČNÍKOVÉ AKUMULÁTORY	19
1.3. SUPRAVODIVÉ INDUKČNÍ AKUMULÁTORY	21
1.3.1. LFP akumulátory	22
1.3.2. Supravodiče II. Typu	22
1.3.3. SMES.....	22
1.4. SUPERKONDENZÁTORY.....	23
1.4.1. Rozdělení superkondenzátorů	27
1.4.2. Elektrochemické dvouvrstvé kondenzátory	28
1.4.3. Pseudokondenzátory	32
1.4.4. Hybridní kondenzátory.....	33
1.4.5. Konstrukce.....	34
1.4.6. Aplikace superkondenzátorů	36
1.5. SROVNÁNÍ AKUMULÁTORŮ.....	36
2. AKUMULAČNÍ SYSTÉMY SE SUPERKONDENZÁTOREM.....	38
2.1. ZVYŠOVACÍ MĚNIČ	38

2.2.	IZOLOVANÝ ZVYŠOVACÍ MĚNIČ	40
2.3.	DVOUČINNÝ MĚNIČ	41
2.4.	DVOUČINNÝ MĚNIČ PROUDU.....	42
2.5.	DVOUKVADRANTOVÝ PULZNÍ MĚNIČ.....	43
2.6.	ČTYŘKVADRANTOVÝ PULZNÍ MĚNIČ	44
2.7.	NAPÁJENÍ	46
2.8.	VEDENÍ.....	47
2.9.	VOZIDLO	48
2.10.	MĚNIČ	49
2.11.	SUPERKONDENZÁTOR	49
3.	SIMULACE	52
3.1.	JÍZDNÍ DATA	52
3.2.	MĚŘENÉ VELIČINY.....	54
3.3.	PODMÍNKY.....	58
3.4.	HODNOCENÍ.....	59
3.5.	PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ	60
ZÁVĚR	61
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratk

AC Alternating Current

DC Direct Current

EDLC Electrochemical Dual Layer Capacitor

ESR Equivalent Serial Resistance

HTM Heavy Transportation Modules

HTS High Temperature Superconductors

Li-Ion Lithium Ion

LTS Low Temperature Superconductors

LFP Lithium Ferrum Phosphate

MHD Městská Hromadná Doprava

MLC Magnetically Loaded Composite

Ni-Cd Nikl Cadmium

Ni-Fe Nikl Ferrum

Ni-MH Nikl Metal Hydrid

SMES Superconducting Magnetic Energy Storage

SC Super Capacitor

RMS Root Mean Square

UPS Uninterruptible Power Supplies

Úvod

Akumulace energie je důležitou součástí všech energetických systémů. Akumulace elektrické energie je proces uchování energie pro pozdější využití. Jedná se tedy o nahromadění energie v okamžiku, kdy je energie přebytek a její následné využití v době kdy zdroj není k dispozici nebo nestačí krýt spotřebu.

Spotřeba energie stále výrazně roste po celém světě. S rostoucí spotřebou energie se přímo úměrně zvyšuje i nutnost její akumulace. To jednak z ekonomických, ale také provozních příčin.

Pro uchování energie slouží akumulátor, což je technické zařízení, které je schopno opakovaně akumulovat energii a dát ji k dispozici k využití ve vhodný čas, na vhodném místě v dostatečně velké kvalitě i kvantitě. Podle množství energie a rychlosti je následně potřebné vybrat vhodný způsob akumulace.

Pro potřeby energetiky, kde je zapotřebí akumulovat velké množství energie, nepostačuje přímá akumulace elektrické energie, proto se musí elektrická energie přeměnit a uchovat v jiné formě. V podmínkách České republiky jsou nejužívanější akumulací přečerpávací vodní elektrárny, kde je elektrická energie přetransformována na energii potenciální a poté získávána zpět. Dalším, u nás však dosud nevyužívaným řešením, je skladování energie pomocí stlačeného vzduchu do podzemních dutin, který je při potřebě elektrické energie expandován přes turbínu.

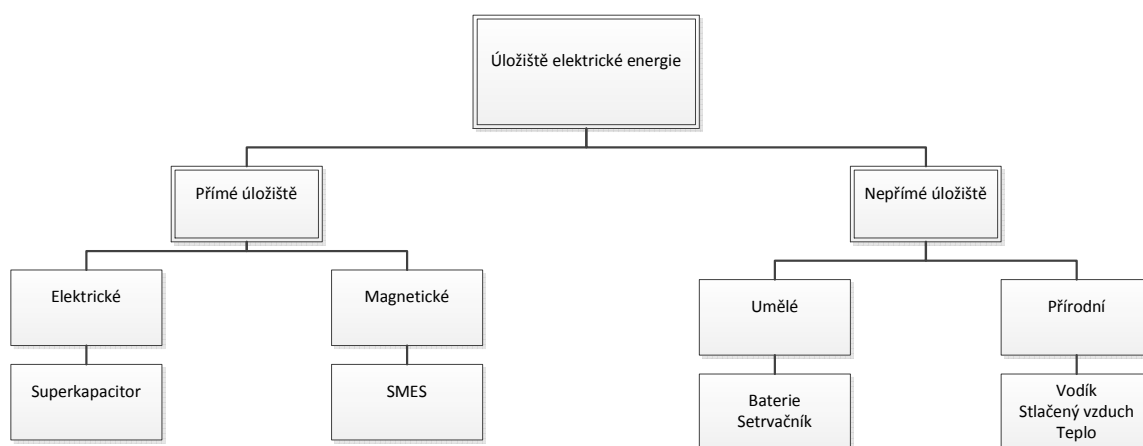
Největší pozornost je dnes, ale věnována způsobům akumulace energie pro akumulaci elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů a pohon dopravních prostředků.

Na vozidlech bývají tradičními akumulátory sekundární články, ale v poslední době se rozšiřují i setrvačníky a superkondenzátory. Vzhledem k předchozímu studiu drážních elektrických vozidel, jsem se ve své práci rozhodl zpracovávat akumulční systémy v podmínkách drážních vozidel MHD. Vzhledem k velké dynamičnosti elektrického pohonu vozidel se jeví jako vhodný akumulátor superkondenzátor.

Otázkou je, jestli je výhodné z finančního hlediska vybavovat akumulčním systémem současná vozidla. Nástrojem pro vyhodnocení je simulace provozu zařízení vybaveného akumulčním systémem se superkondenzátorem.

Akumulátory elektrické energie

Elektrická energie může být uložena různými způsoby. Základní rozdělení je na obrázku 1.1. Přímá úložiště jsou taková, z nichž můžeme energii čerpat do elektrické sítě rovnou. Nepřímé dodávají elektrickou energii skrze generátor. To snižuje výslednou účinnost, zvyšuje hmotnost, cenu a velikost zařízení.



Obr. 1.1 Rozdělení úložišť elektrické energie

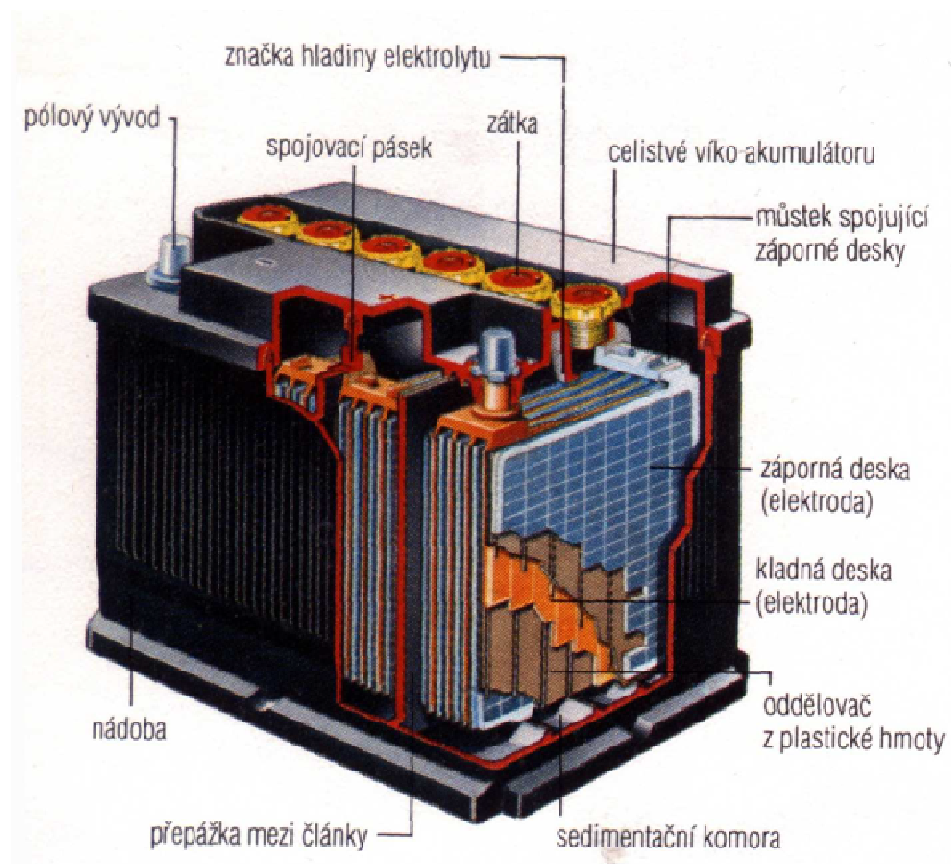
V následujících odstavcích se zabývám všemi druhy akumulačních médií, vyjma těch přírodních, protože jejich aplikace v průmyslové elektronice nejsou tak časté.

1.1. Sekundární články

Sekundární články jsou elektrochemické akumulátory. energii nesou chemické vazby uvnitř článku. Rozbíjením vazeb se energie uvolňuje. Na rozdíl od primárních článků, u sekundárních článků je možné dodáním elektrické energie tyto vazby opětovně vytvářet.

1.1.1. Olověné články

V člancích jsou olověné desky kladné a záporné polarity, kdy záporných je o jednu více. V článku se mezi sebou desky střídají a jsou ponořeny do zředěné kyseliny sírové. Články mají pod deskami odkalovací prostor pro uvolněný materiál z desek. Mezi jednotlivými deskami jsou umístěny separátory, které zabraňují vzájemnému dotyku desek a zpevňují konstrukci. Všechny desky stejné polarity jsou propojeny a vyvedeny na horní stranu článku. Vývody jsou pod víkem nádoby propojeny, první a poslední vývod je vyveden vně víka a slouží k připojení kabelů. Geometrická velikost desek udává kapacitu článku a max. velikost odebíraného proudu. Celá konstrukce akumulátoru je dobře patrná na obrázku 1.2.



Obr. 1.2 Konstrukce akumulátoru [1]

Každý článek má bez zatížení napětí v rozmezí 2,0 – 2,15 V. Tato hodnota při odběru proudu klesá, do určité hodnoty klesá nepatrně, při velkém odběru v řádu stovek ampérů může klesnout až na 1,4 V. Bez zatížení i ve vybitém stavu je napětí článku okolo 2,1 V,

proto měření napětí naprázdno nedává správnou informaci o stavu nabití akumulátoru. Při nabíjení se napětí zvyšuje až k hodnotě 2,75 V, ta je udávána jako znak plného nabití při nabíjení. Při nabíjení na deskách vzniká kyselina sírová a elektrolyt tak houstne. Další zvyšování již nemá význam, všechen proud pouze rozkládá vodu.

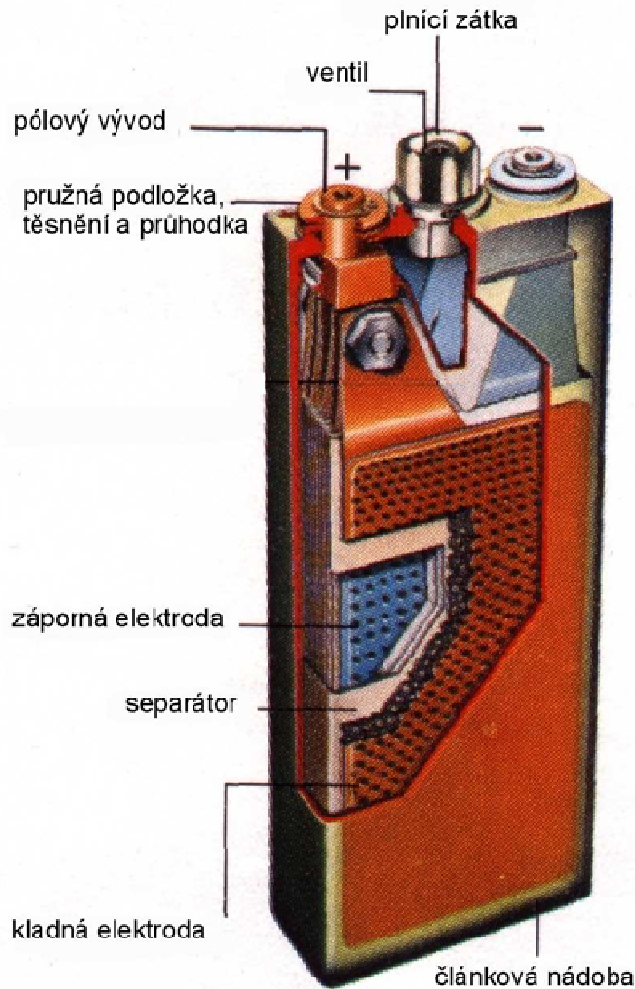
Po ukončení nabíjení je na kladné elektrodě oxid olovičitý a na záporné elektrodě je rozptýlené olovo. Po připojení zátěže se začne článěk vybíjet a začne probíhat opačná chemická reakce než u nabíjení. Vybíjet lze články až na hodnotu 1,8V, kdy musíme zátěž odpojit, aby se akumulátor nepoškodil. Hustota elektrolytu se s vybíjením zmenšuje, je proto dobrým ukazatelem stavu nabití. V praxi je hodnota napětí závislá na konstrukci elektrod, teplotě prostředí, použitých nabíječích a způsobu provozu.

Jejich výhodou je nízká pořizovací cena, která je dána již dobře zvládnutou technologií výroby. Dobrá spolehlivost a účinnost. Ta se pohybuje okolo 82 až 91%.

Nevýhodou je poměrně nízká životnost (5 let až 500 cyklů), trpí samovybíjením (cca 1% kapacity denně). Nabíjení by mělo být maximálně desetinou nominální kapacity baterie. Škodí jí přebíjení a hluboké vybíjení (pod 60% kapacity) a dlouhodobé stání ve vybitém stavu. Je také náchylná na otřesy. Nutností je provádění údržby v očišťování povrchu, konzervace baterie a doléváním destilované vody. To však už u nových, bezúdržbových, hermeticky uzavřených baterií odpadá. Také se prodloužila životnost až na 15 let.

1.1.2. Ni-Cd akumulátory

Akumulátory Ni-Cd se skládají z kladné elektrody tvořené hydroxidem nikelnatým Ni(OH)_2 s přísadou grafitu a záporné elektrody z hydroxidu kademnatého Cd(OH)_2 s přísadou disperzního železa a grafitu. Úkolem separátoru je oddělení kladné a záporné elektrody, materiálem bývá polypropylén. Elektrolyt je tvořen vodným roztokem hydroxidu draselného KOH. Nádoba je vyrobena z polypropylenu. Konstrukce akumulátoru je zřetelná z obrázku 1.3.



Obr. 1.3 Konstrukce Ni-Cd akumulátoru [1]

Na rozdíl od olověných článků, kde jsou olověné desky jak konstrukční, tak aktivním materiálem, a v důsledku činnosti dochází k opotřebování kladné elektrody někdy až k jejímu zhroucení. Akumulátory Ni-Cd mají aktivní materiál uzavřen v kapsách z perforovaných ocelových pásků, to zajišťuje dobrou mechanickou odolnost, navíc ocel nereaguje se zásaditým elektrolytem a nedochází k jejímu poškození během celé životnosti akumulátoru.

Ni-Cd baterie vykazují vysokou životnost a odolnost vůči nepříznivým vlivům teploty. U železničních baterií je garantována životnost 20 let a provoz při teplotách od 50 do 70 °C. Mají nízký vnitřní odpor a jsou schopny krátkodobě dodávat vysoký proud. Dají se nabíjet až desetinasobkem kapacity článku. Mají schopnost rychlého nabíjení (až 50% kapacity).

Akumulátor má vyšší odolnost proti přebíjení, to neškodí, jen je nutné častěji dolévat destilovanou vodu. Mohou být dlouhodobě skladovány ve vybitém stavu.

Nevýhodou je nižší napětí článků. Po nabití je jmenovité napětí článku 1,2 V. Oproti olověným akumulátorům mají také nižší účinnost (75 až 89%). Akumulátor obsahuje kadmium, které je považováno za vysoce toxické. Na rozdíl od olověných článků se u nich ale objevuje jev zvaný napěťová deprese, nebo také paměťový jev. K tomuto jevu dochází v okamžiku, kdy ještě nevybitou baterii začneme opět nabíjet, baterie si „pamatuje“ poslední úroveň nabití a v okamžiku, kdy opět této úrovně dosáhneme při dalším cyklu, začne se chovat jako vybitá. Odstranění tohoto stavu se provádí několikanásobným nabitím a úplným vybitím

1.1.3. Ni-Fe akumulátory

Akumulátory Ni-Fe se velmi podobají akumulátorům Ni-Cd, skládají se z kladné elektrody tvořené hydroxidem niklu s přísadou grafitu a záporné elektrody z Fe_3O_4 s přísadou malého množství NiSO_4 , FeS a grafitu.

Jejich výhodami je životnost až 25 let nebo 4000 cyklů, napětí článku 1,4 V, odolnost proti přebíjení a hlubokému vybíjení. Se stářím neroste samovybíjení a postrádá paměťový efekt. Jejich účinnost se pohybuje mezi 73 až 87 %. Navíc patří mezi ekologicky šetrné zdroje, neboť obsahují ekologicky nezávadné železo místo olova či kadmia.

Mezi nevýhody patří to, že Ni-Fe akumulátory nelze nabíjet proudy menšími než 0,05 jmenovitého proudu, protože takto malý proud se spotřebuje na elektrolýzu vody z elektrolytu. Ni-Fe akumulátory nemůžeme použít v zařízeních s trvalým dobíjením a nelze je nabíjet na konstantní napětí.

1.1.4. Ni-MH akumulátory

Akumulátory Ni-MH jsou dalším typem alkalických baterií. Jsou konstrukčně a některými elektrickými vlastnostmi velice podobné s Ni-Cd. Rozdíl v konstrukci záporné

elektrody, kde místo kadmia je použito slitiny kovu (lanthan, cer, neodym, praseodym, titan, vanad, nikl, kobalt, mangan, hliník, zirkon, železo) s vodíkem, tzv. metalhydrid. Kladná elektroda je stejně jako u Ni-Cd tvořena hydroxidem niklu. Separátor oddělující obě elektrody obsahuje alkalický elektrolyt (hydroxid draselný). Obě elektrody jsou vysoce porézní a u válcových článků, jsou stočené do svitku. Jako separátor se používá syntetický netkaný materiál, který izoluje kladnou elektrodu od záporné. Elektrolyt je absorbován v elektrodách i v separátoru. Tlakové poměry v článku jistí bezpečnostní ventil. Konstrukčním provedením se Ni-MH články shodují se stejným konstrukčním řešením Ni-Cd.

V porovnání s Ni-Cd akumulátory má Ni-MH přibližně dvojnásobnou hustotu energie. Není tolik náchylný na paměťový efekt. Oproti Ni-Cd dosahují až dvojnásobné hodnoty měrné energie a výkonu.

Nevýhodou Ni-MH článků je mnohem menší životnost, udává se 500–1000 nabíjecích cyklů. Nedokáží také poskytnout tak vysoké vybíjecí proudy. Postupným zvyšováním počtu nabíjecích cyklů se postupně začíná snižovat kapacita článku, tento jev se může urychlit přebíjením, skladováním, používáním za vysokých teplot nebo špatným párováním článků. Tento jev nemá žádnou souvislost s paměťovým jevem.

Vyšší rozšíření Ni-MH akumulátorů je důsledkem postupného vytlačování Ni-Cd baterií z některých aplikací kvůli vysokému množství a toxicitě kadmia. Celkový ekologický dopad Ni-MH je ale určen druhem kovu, který je použit na katodu, a způsobem jeho těžby. Výsledná zátěž pro životní prostředí může být téměř shodná.

1.1.5. Li-Ion akumulátory

Akumulátory Li-Ion mají elektrody vytvořené z interkalačních sloučenin. Jsou to sloučeniny, které mohou do své mřížky přijmout cizí atom nebo molekulu. Katoda je vyrobená ze sloučenin LiCoO_2 , LiMn_2O_4 nebo LiNiO_2 . Pro anody je použita uhlíková matrice. Matrice musí velmi dobře přijímat ionty Lithia a opět je uvolňovat. Tato vlastnost je charakteristická pro Li-Ion akumulátory.

Elektrolyt se skládá z vodivé soli a rozpouštědla. Složení se liší podle výrobců. Jako vodivá sůl bývá použita LiPF_6 . Jako rozpouštědlo se používají různé směsi etylen-, propylen-, dimetr-, dietyl- nebo metyletylkarbonát. Separátory bývají většinou vyrobeny z velmi tenké porézní fólie z polyetylenu nebo polypropylenu. Mají jmenovité napětí 3,6V.

Největším problémem ve vývoji bylo zajištění bezpečnosti lithiových článků, lithium má mimořádně vysokou reaktivitu se vzduchem a vodnými roztoky, kdy v přímém kontaktu dochází k hoření a podle povahy okolí může dojít až k výbuchu. Řešení je možné vylepšením ochrany povrchu, nebo použitím méně reaktivních sloučenin lithia.

Pokud porovnáme elektrické vlastnosti lithiových a Ni-MH akumulátorů, lithiové akumulátory nabízejí dvakrát až čtyřikrát vyšší energetickou hustotu.

V současnosti jsou komerčně dostupné články o kapacitě 60 až 100 Ah. Mezi omezující faktory patří samotný výrobní proces. Ten je v současnosti založen na stáčení svitkového svazku z kontinuálního elektrodového pásu. Tím sice lze dosáhnout téměř libovolné kapacity, ale narážíme na problém kontaktování elektrodového systému a zajištění rovnoměrného proudového zatížení celé struktury. Dalším omezením je chlazení rozměrných článků při nabíjecích a vybíjecích cyklech.

Výhodou akumulátorů na bázi lithia je velmi vysoká životnost, pohybovat podle typu od 500 do 2000 cyklů, netrpí paměťovým jevem a v podstatě netrpí samovybíjením. Výhodou oproti akumulátorům založených na niklu je absence paměťového efektu. Netrpí příliš samovybíjením, přibližný úbytek energie je 1% za měsíc. Navíc má akumulátor vysokou energetickou účinnost (80%) a životnost (600-2000 cyklů).

Jako jedna z nevýhod je nízká hodnota nabíjecích proudů (nelze použít rychlé nabíjení jako u Ni-Cd), dále snižování kapacity při teplotách pod nulou. Jako další nevýhoda je vysoká cena lithia. Běžné lithiové akumulátory vyžadují speciální typ nabíječe s přesným dodržováním hodnoty maximálního nabíjecího napětí. Mezi největší nevýhodu patří stárnutí akumulátoru bez ohledu na to, zda je používán, přibližně po dvou letech dochází ke skokově změně kapacity přibližně na polovinu. Navíc jsou tyto akumulátory citlivé na úplné vybíjení, kdy jejich vybitím může dojít až ke zničení samotného akumulátoru.

1.1.6. LFP akumulátory

LFP baterie mají velké množství podobných vlastností, jako Li-Ion akumulátory, mezi jejich klíčový rozdíl patří odolnost vůči tepelným účinkům a schopnost dodávat velké proudy při špičkových odběrech. Tepelná odolnost je zajištěna samotným materiálem LiFePO_4 , ten je bezpečnější než LiCoO_2 . K havarijnímu stavu dochází až při extrémních přehřátích (800°C a více).

Nabíjí se stejně, jako Li-Ion nebo Li-Pol články systémem CC/CV (konstantní proud/konstantní napětí), tzn. nabíjení konstantním proudem, dokud napětí nedosáhne maximální hodnoty 3,6V. Následně se napětí udržuje na této hodnotě a pozvolna klesá proud, dokud neklesne na stanovenou hodnotu. Napětí článku je 3,3. Díky rozdílnému napětí nelze akumulátory nabíjet na běžných Li-xx nabíječích. Z článků je možné skládat libovolné sestavy (sériové, paralelní i sérioparalelní)

Výhodou LFP akumulátorů oproti ostatním lithiovým článkům je vysoká životnost. Je stanovena na 10 let nebo 2000 cyklů. Dále také ekologičnost, bezpečnost a cena materiálu.

Nevýhodou oproti LiCoO_2 akumulátorům je oproti LFP nižší napětí, energetická hustota 110 Wh/kg a hustota výkonu 3000 W/kg. Tento fakt je ale vykompenzován pomalejším snižováním maximální kapacity. Udává se, že po roce používání je energetická hustota již téměř shodná. U nových LFP bylo zjištěno, že dochází k jejich předčasnému selhání v případě hlubokého vybíjení pod úroveň 33%.

1.2. Setrvačnickové akumulátory

Setrvačnick je schopen akumulovat energii v podobě kinetické energie rotující hmoty.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1.1)$$

Ze vztahu 1.1 je patrné, že kinetická energie rotujícího tělesa je rovna momentu setrvačnosti setrvačnicku J a druhé mocnině úhlové rychlosti ω . Kdy úhlová rychlost je přímo úměrná otáčkám f dle vztahu 1.2.

$$\omega = 2\pi f \quad (1.2)$$

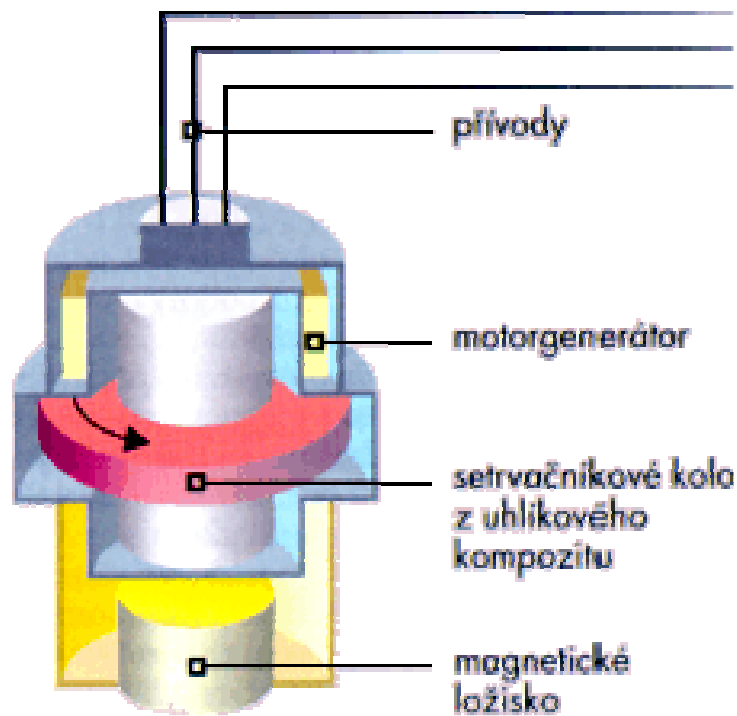
Z toho je patrné, že i lehký setrvačnick s velkými otáčkami akumuluje velké množství energie. Existují setrvačnick s rotory z kompozitních materiálů o hmotnostech v řádu kilogramů schopných dosáhnout 55 000 otáček za minutu. Toto snižuje účinnost akumulace, protože například odpor ložisek a vzduchu se zvyšuje zhruba se čtvercem otáček. Kvůli omezení těchto ztrát je rotor uložen v magnetických ložiskách a otáčí se ve vakuu. Tím bylo dosaženo účinnost akumulace okolo 95%. Součástí rotoru je motorgenerátor, který ho roztáčí, nebo při brzdění generuje energii na úkor svých otáček.

Tato konstrukce setrvačnicku je označována jako MLC. Konstrukce MLC akumulátoru je patrná na obrázku 1.4. Tyto setrvačnick dokážou dodávat energii se zpožděním pouhých zlomků sekundy.

Jelikož selhání setrvačnicku může mít kritické následky, je nutné zajistit bezpečnost. Ta se realizuje vhodnou konstrukcí setrvačnickového kola a celého zařízení. V případě roztržení kola se u kompozitů nesetkáváme s velkým množstvím úlomků. Pokud by úlomky měly opustit nádobu setrvačnicku, je zajištěno, aby vylétaly do oblasti relativně bezpečné např. pod vozidlo.

Velkým plusem setrvačnicků je spolehlivost, ekologičnost a efektivita, jejich nevýhodou je však vysoká cena, potřeba údržby, bezpečnostní rizika a ztráty energie za chodu.

Se setrvačnick se můžeme setkat v průmyslu pro překonání krátkodobého výpadku sítě, systémy KERS u dopravních prostředků.



Obr. č. 1.4: Konstrukce MLC [2]

1.3. Supravodivé indukční akumulátory

Energii lze akumulovat v magnetickém poli. Množství energie akumulované v magnetickém poli lze vyjádřit vztahem 1.3.

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.3)$$

Z ní je patrné, že množství energie jednak určuje indukčnost L , ale také čtverec proudu I , jež protéká cívkou. Bohužel s rostoucím proudem se zvyšují také Jouleovy ztráty ve vodiči. Ty jsou dány vztahem 1.4.

$$P_{\text{vod}} = I^2 R \quad (1.4)$$

Z předchozích dvou vztahů je zřejmé, že abychom dosáhli velkého množství akumulované energie tak musí akumulátorem protékat vysoký proud. Ten však také zvyšuje ztráty akumulátoru. Tyto ztráty lze eliminovat snížením odporu.

Použitím supravodivých materiálů, lze ale tyto ztráty eliminovat. Supravodiče mají svůj odpor R roven nule. Materiál se stává supravodivým jen za nízkých teplot.

1.3.1. LFP akumulátory

Jedná se o některé prvky např. olovo (7,2 K) či cín (3,7-5,3 K). Vznik supravodivosti je u těchto materiálů popsán teorií vzniku Cooperových párů. Jelikož supravodivost u nich nastává při teplotách blízkých absolutní nule, označují se jako LTS. Aby bylo možné dosáhnout takto nízkých teplot je nutné chlazení zkapalněným heliem. To zapříčiňuje vysoké náklady, což brání rozšíření LTS.

1.3.2. Supravodiče II. Typu

Ukázalo se, že supravodivost se vyskytuje nejen u kovů, ale i u slitin a také i u speciální keramiky. Ty již mají kritické teploty, kdy se projevuje supravodivost, mezi 90 K až 150 K. Na ty to teploty lze supravodič zchladit kapalným dusíkem (bod varu 77 K). Kapalný dusík je relativně levná chladicí kapalina. Dusík je snadno dostupný a chlazení na teplotu 77 K je asi 25krát energeticky méně náročné oproti teplotě 4 K pro nízkoteplotní supravodiče.

1.3.3. SMES

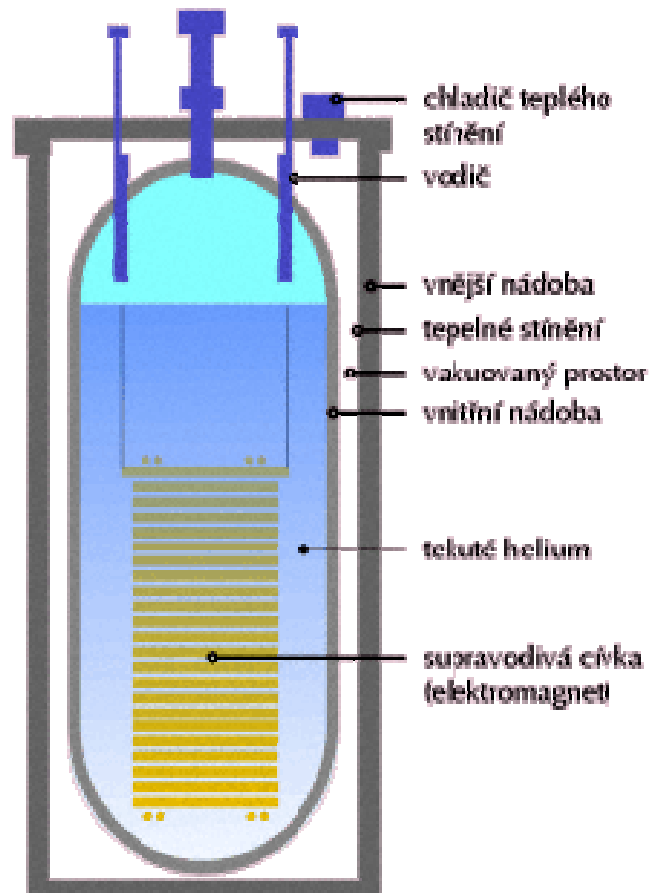
SMES je zařízení skladující energii v magnetickém poli supravodivých cívek. Ukládání energie probíhá prostým připojením cívek ke zdroji elektrické energie, po odpojení může proud v cívkách bezeztrátově cirkulovat díky supravodivosti materiálu cívek. Využity jsou supravodiče II typu. Konstrukce akumulátoru je patrná na obrázku 1.5.

Účinnost tohoto zařízení sice snižuje příkon chladicího systému a dále pak ztráty v usměrňovači / měniči. Přesto jsou ztráty v porovnání s ostatními metodami uskladnění energie velmi nízké. Celková účinnost je pak kolem 95% a systém vydrží několik milionu cyklů.

Výhodou SMES je možnost velmi rychlého vybití a dlouhá životnost. K nevýhodám patří cena a bezpečnost zařízení. Při porušení supravodivosti vznikne žhavé místo, které

rychle roste vlivem uvolňující se energie a hrozí destrukce zařízení. Následky záleží na množství naakumulované energie.

Vzhledem k poměrně nízkým kapacitám používaných systémů v řádu kWh a stále značně vysoké ceně jsou indukční akumulátory používané zejména k zvyšování kvality dodávek elektrické energie, nebo jako zdroje velmi vysokých krátkodobých výkonů. V budoucnosti vzhledem k vývoji supravodivých materiálů by se mohlo jednat o perspektivní akumulátor energie.



Obr. 1.5 Konstrukce SMES [2]

1.4. Superkondenzátory

Konvenční kondenzátory se skládají ze dvou vodivých elektrod oddělených izolačním dielektrickým materiálem. Když je připojeno napětí na kondenzátor, opačné náboje se nahromadí na povrchu elektrod. Náboj je držen dielektrikem, takto vytvořené elektrické pole dovoluje kondenzátoru akumulovat energii. Princip je parný na obrázku 1.6.

Kapacita C je definována jako poměr uloženého náboje Q a svorkového napětí U .

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (1.5)$$

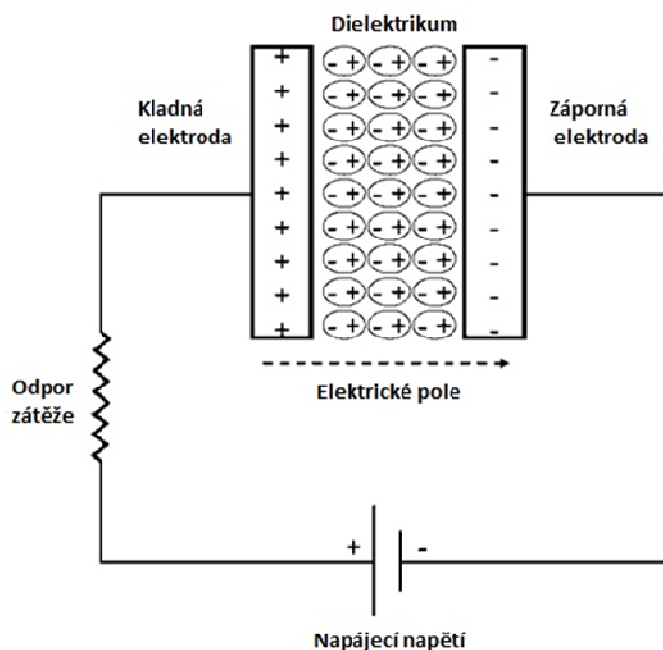
Pro konvenční kondenzátory je C přímo úměrné ploše povrchu S každé elektrody a nepřímo úměrné vzdálenosti elektrod.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}. \quad (1.6)$$

V rovnici 1.6 je vidět, že kapacita je také závislá na permitivitě materiálu. Ta je dána jako násobek permitivity vakua ϵ_0 a relativní permitivity materiálu ϵ_r .

Jeden z primárních atributů kondenzátoru je měrná energie a výkon. Výkonem je myšlen měrný špičkový výkon, který může superkondenzátor dodávat či akumulovat na jednotku objemu či hmotnosti. Hustota může být vypočítaná jako množství energie na jednotku hmotnosti nebo objemu. Energie E , uložená v kondenzátoru je přímo úměrná jeho kapacitě a kvadrátu napětí, dle vztahu 1.7.

$$E = \frac{1}{2} CU^2. \quad (1.7)$$



Obr. č. 1.6 Princip konvenčního kondenzátoru [3]

Vnitřní části kondenzátoru (například: přívody, elektrody a dielektrický materiál) také přispívají k odporu, který je celkově vyjádřený jako ekvivalentní předřadný odpor (ESR). Napětí během vybíjení je snižováno o úbytky na těchto odporech. Znalostí ESR a U zjistíme maximální nabíjecí nebo vybíjecí výkon kondenzátoru P_{\max} . Ten je dán vztahem 1.8.

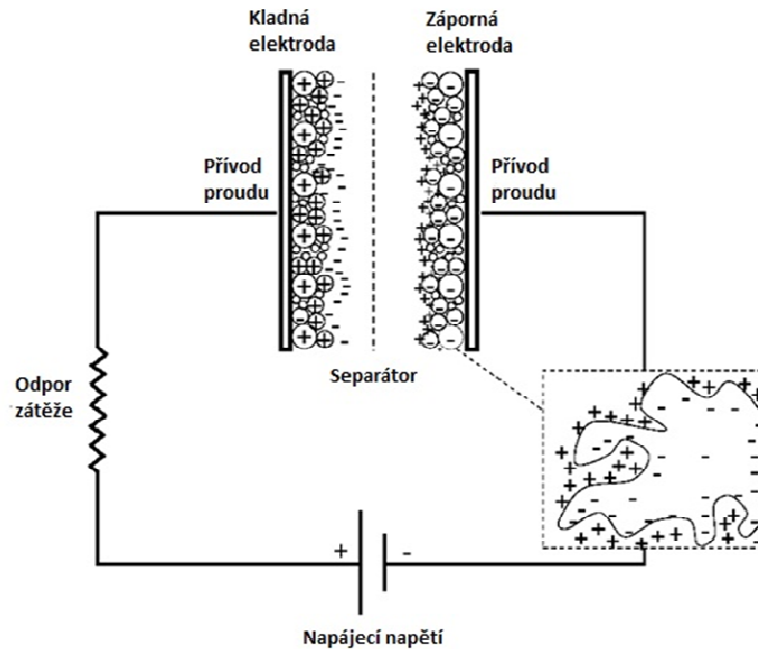
$$P_{\max} = \frac{U^2}{4ESR} \quad (1.8)$$

Nabíjením a vybíjením se kondenzátor opotřebovává, počet nabití a vybití bez změny parametrů se udává jako cyklická stabilita.

Konvenční kondenzátory mají nízkou koncentraci energie ve srovnání s elektrochemickými bateriemi a palivovými články. Baterie sice dokáží při stejné hmotnosti uložit více energie než kondenzátor, ale za to ji nemůžou dodat tak rychle jako kondenzátor.

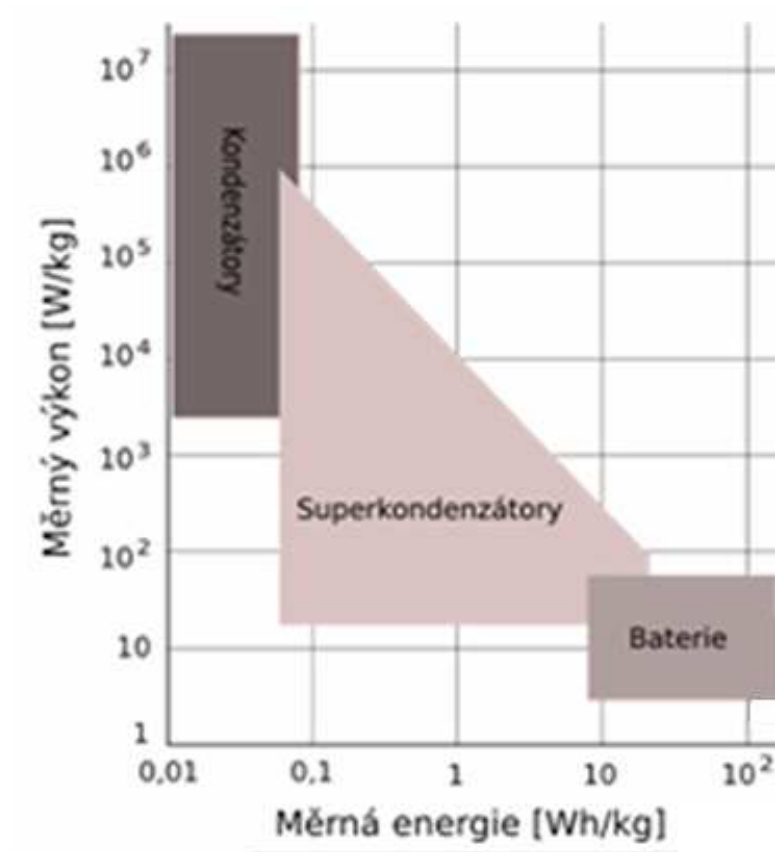
Superkondenzátory pracují na obdobném principu jako konvenční kondenzátory. Na rozdíl od nich však mají vyšší plochu povrchu S a podstatně nižší tloušťku dielektrika d mezi elektrodami. To vede dle vztahů 7 a 8 na zvýšení maximálního množství akumulované energie.

Superkondenzátory mají několik výhod nad elektrochemickými bateriemi. Výhodami jsou kratší nabíjecí doba, vyšší cyklická stabilita a menší nároky na skladování. Obrázek 1.7 ukazuje schéma funkce superkondenzátoru.



Obr. 1.7 Princip superkondenzátoru [3]

Z obrázku 1.8 je vidět, že superkondenzátory vyplňují místo mezi konvenčními kondenzátory a bateriemi, částečně se s nimi překrývají. Zdá se superkondenzátor blíží svými parametry více k bateriím či klasickým kondenzátorům, záleží na technologii součástky. Ta je rozebrána dále.



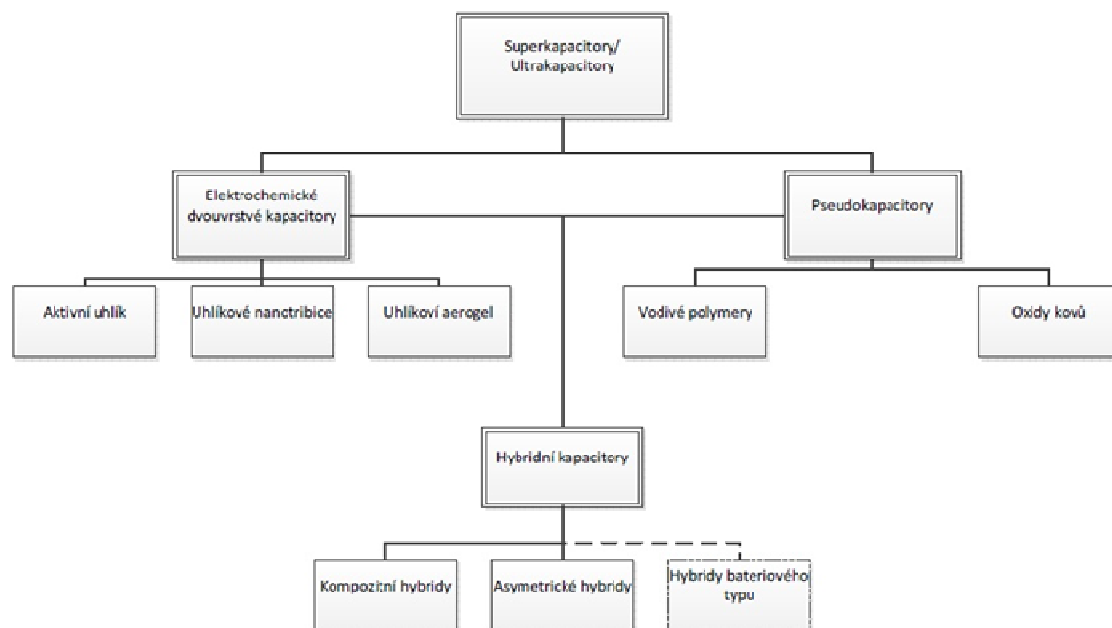
Obr. 1.8 Rozložení akumulčních médií dle parametr [4]

1.4.1. Rozdělení superkondenzátorů

Superkondenzátory mohou být rozděleny do tří hlavních tříd:

- **elektrochemické dvojvrstvé kondenzátory (ne-faradický)**
- **pseudokondenzátory (faradický)**
- **hybridní kondenzátory (kombinace obou)**

Každá třída se vyznačuje jedinečným mechanismem ukládání energie. Tyto mechanismy jsou ne-faradické, faradické a kombinace obou. Faradické procesy jsou oxidačně-redukční mezi elektrodou a elektrolytem. Ne-faradický procesy neužívají chemický mechanismus. Grafické rozdělení tříd a podtříd superkondenzátorů, podle materiálu elektrody je na obrázku 1.9.



Obr. č.1.9: Rozdělení superkondenzátorů

1.4.2. Elektrochemické dvouvrstvé kondenzátory

ELDC ze dvou uhlíkových elektrod, elektrolytu a separátoru. Obrázek 6 zobrazuje typický EDLC. Jako konvenční kondenzátory, EDLC ukládají náboj elektrostatičticky neboli ne-faradicky, nedochází k přenosu náboje mezi elektrodou a elektrolytem.

Ve vybitém stavu jsou ionty elektrolytu rozloženy rovnoměrně. Při přivedení stejnosměrného napětí se vytvoří mezi elektrodami elektrické pole. Ke kladné elektrodě jsou přitahovány záporné ionty elektrolytu a k záporné elektrodě kladné ionty. Takto vzniká elektrická dvojvrstva, která oddělí od sebe náboj na kladné elektrodě od náboje na elektrodě záporné. Každé rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem tvoří samostatný kondenzátor. Separátor zabraňuje rekombinaci iontů elektrolytu. Tyto dvojvrstvy, spolu se zvýšením plochy povrchu a snížením vzdálenosti mezi elektrodami, dovolují EDLC dosáhnout vyšších kapacit než konvenční kondenzátory.

Protože nedochází k přenosu náboje mezi elektrolytem a elektrodou, tak se nemění chemické složení ve spojení s ne-faradickými procesy. Z tohoto důvodu je náboj uložený v EDLC je vysoce reversibilní, to umožňuje velký počet cyklů nabíjení a vybíjení. EDLC

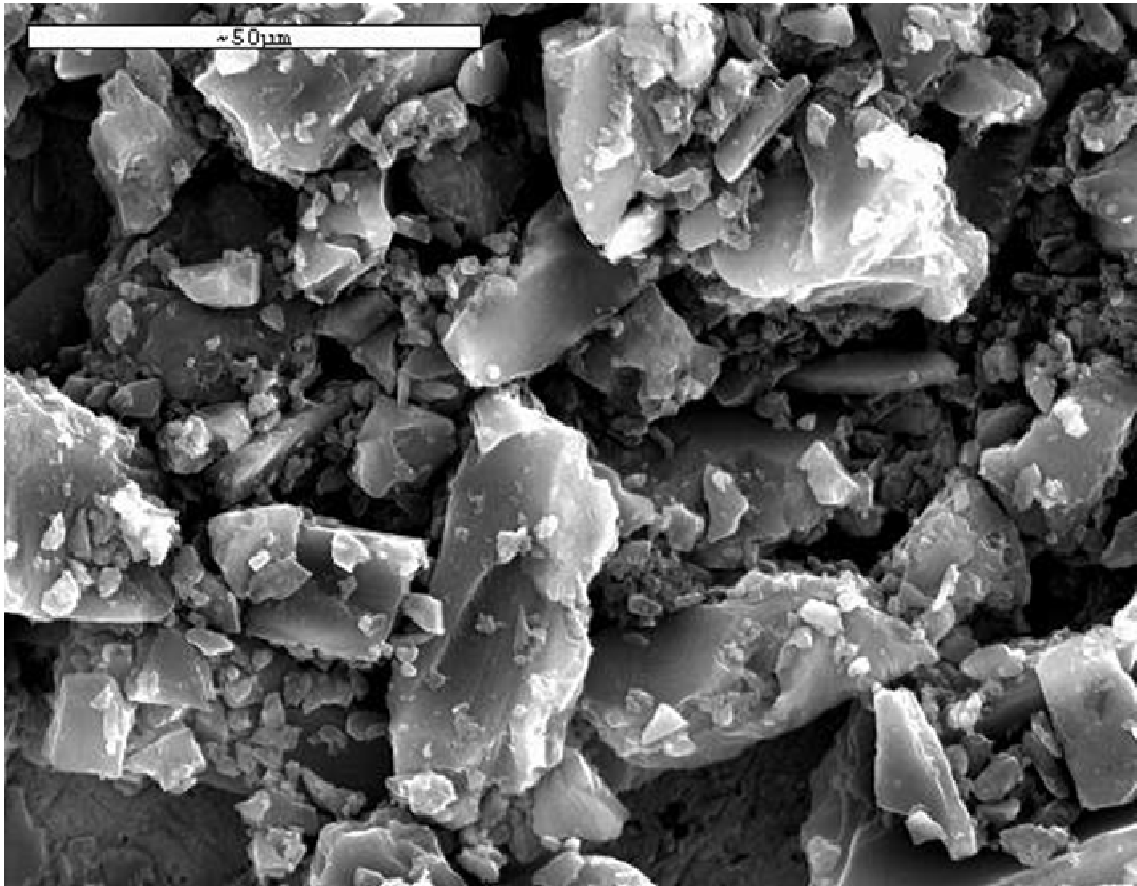
dosahují bez ztráty parametrů až 10^6 počtu cyklů. Elektrochemické baterie dosahují pouze 10^3 cyklů. Díky tomuto je vhodné je používat v aplikacích, kde je ztížená možnost údržby např. hluboká moře nebo horská prostředí.

Parametry superkondenzátoru jsou ovlivňovány použitým elektrolytem. V EDLC se používá buď anorganický, nebo organický elektrolyt. Anorganické elektrolyty jako H_2SO_4 a KOH mají obecně nižší hodnotu ESR a nižší minimální velikost pórů ve srovnání s organickými elektrolyty, jako je acetonitril. Nicméně anorganické elektrolyty také mají nižší průrazné napětí. Proto ve výběru mezi anorganickým nebo organickým elektrolytem, nutně zvážit kompromis mezi kapacitou, ESR a napětím. Kompromis při volbě elektrolytu je převážně závislý na aplikaci superkondenzátoru.

Zatímco povaha elektrolytu je velmi důležitá co se týče návrhu superkondenzátoru, jednotlivé třídy EDLC jsou pojmenovány dle toho jakou formou uhlíku užívají jako materiál elektrod. Uhlíkové materiály se používají jako materiál elektrod, protože mají vyšší plochu povrchu, nižší cenu, a navíc je zavedena celá řada technologií zpracování než u ostatních materiálů, jako jsou vodivé polymery a oxidy kovů. Elektrody EDLC jsou z aktivního uhlíku, uhlíkového aerogelu, a uhlíkových nanotrubic.

- **Aktivní uhlík**

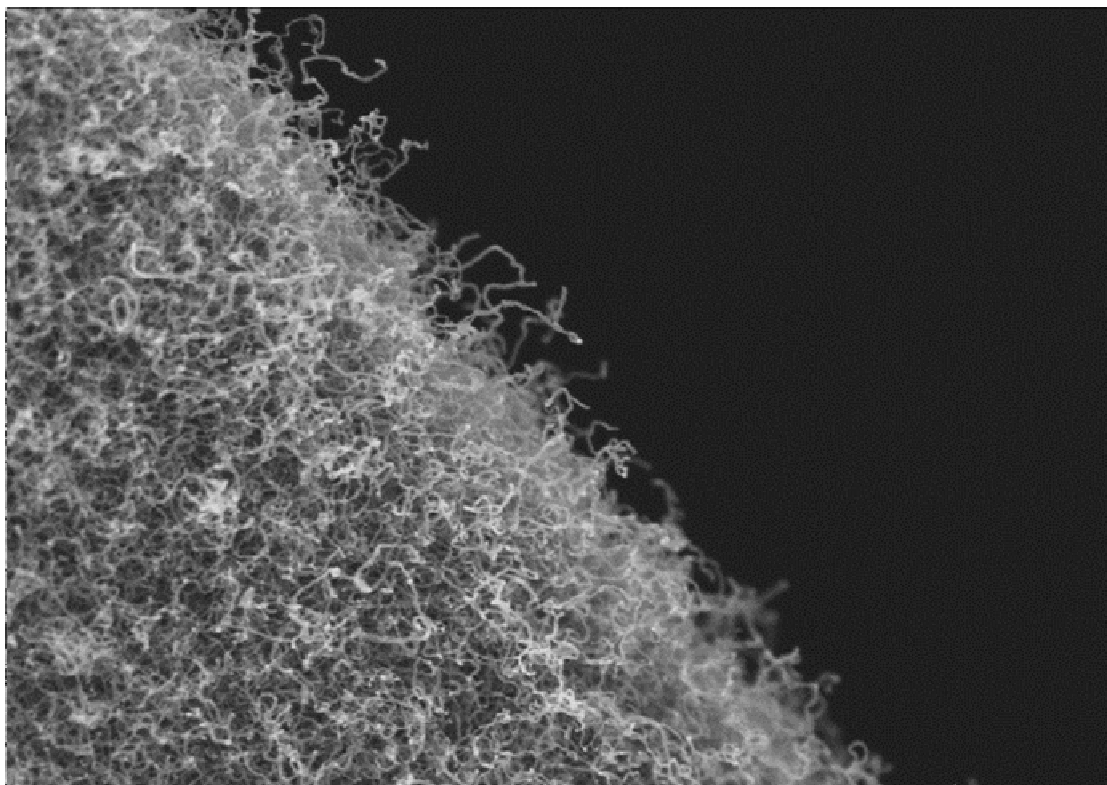
Díky své nízké ceně, vyšší ploše povrchu oproti ostatním uhlíkovým materiálům, je aktivní uhlík nejběžněji užívaný materiál pro výrobu EDLC. Aktivní uhlík se používá pro svou pórovitou strukturu složenou z pórů různých velikostí: mikropór (< 2nm široké), mezopóry (2 - 50 nm), makropóry (>50 nm) k dosažení vysokých ploch povrchu. Strukturu aktivního uhlíku můžete vidět na obrázku 1.10. Přestože je kapacita přímo úměrná ploše povrchu, zkušenost ukazuje, že ne vždy velká plocha aktivního uhlíku přispěje k vysoké kapacitě kondenzátoru. Tento rozpor je způsobený tím, že ionty elektrolytu jsou příliš velké, na to aby se rozptýlili do menších mikropórů. S větší velikostí pórů dosahujeme i vyšších výkonů a menší velikostí pórů dosahujeme vyšší hustoty energie. Momentálně se výzkumníci zaměřili se na určování optimální velikosti pórů pro danou velikost iontu a na zlepšování metod použitých k tomu, aby ovládaly rozdělení velikostí pórů během zhotovení.



Obrázek č. 1.10: Snímek uhlíkového aerogelu z elektronového mikroskopu [3]

- **Uhlíkové aerogely**

Uhlíkové aerogely jsou zajímavým materiálem pro konstrukci elektrod EDLC. Uhlíkové aerogely jsou vytvořeny z nepřerušené sítě vodivých uhlíkových nanočástic s rozptýlenými mezopóry. Struktura aerogelu je dobře patrná na obrázku 1.11. Díky jejich nepřerušené struktuře a jejich schopnosti chemicky se vázat na elektrolit, uhlíkové aerogely nevyžadují použití dalšího pojidla či lepidla. Jako bezpojidlové elektrody, uhlíkové aerogely vykazují nižší ESR než aktivní uhlík. Díky takto sníženému ESR tyto superkondenzátory dosahují vyšších výkonů dle rovnice 9. Tento materiál je velice perspektivní pro budoucí vývoj ELDC.

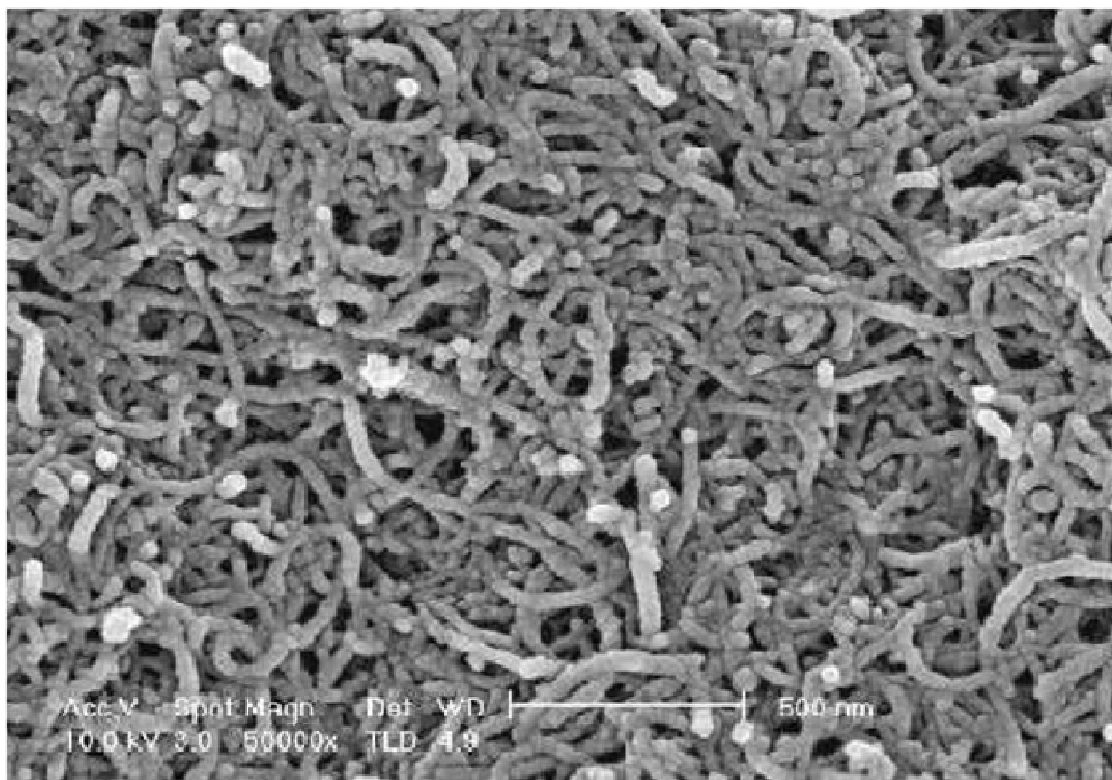


Obrázek č. 1.11: Snímek uhlíkového aerogelu z elektronového mikroskopu [3]

- **Uhlíkové nanotrubičky**

Elektrody z tohoto materiálu v podstatě vypadají, jako rohož spletená z uhlíkových nanotrubic, s otevřenou sítí mezopórů. Tato struktura je zobrazena na obrázku 1.12. Na rozdíl od jiných elektrod založených na uhlíku, mezopóry uhlíkových nanotrubic jsou na elektrodách vzájemně spojeny, to dovoluje užít téměř celou dostupnou plochu povrchu. Plocha elektrod je využita efektivněji, to dovoluje dosáhnout kapacit srovnatelných s ostatními superkondenzátory jež jsou založeny na uhlíku, přestože elektrody z uhlíkových nanotrubic mají nižší plochu povrchu ve srovnání s elektrodami z aktivního uhlíku.

Protože ionty elektrolytu se mohou lépe rozptýlit do sítě mezopór, elektrody z uhlíkových nanotrubic mají nižší hodnotu ESR než ty aktivního uhlíku. Navíc existuje řada technologií zpracování vyvinutých, aby dále snižovaly ESR např. uhlíkové nanotrubičky, mohou být spojeny přímo s přívodem po ošetření teplem. Efektivita využití plochy spletené struktury dovoluje koncentrace energie srovnatelné s ostatními uhlíkovými materiály a zmenšený ESR dovoluje dosažení vyšších výkonů.



Obrázek č. 1.12: Snímek zapletených uhlíkových nanotrubic z elektronového mikroskopu [3]

1.4.3. Pseudokondenzátory

Na rozdíl od EDLC, které ukládají energii v elektrostatickém poli, pseudokondenzátory ukládají náboj faradicky skrz přenos náboje mezi elektrodou a elektrolytem.

To se provádí skrze elektrosorpci, redukčně-oxidační reakce a interkalační procesy. Tyto faradaické procesy dovolují pseudokondenzátorům dosáhnout větších kapacit a hustot energií než EDLC. Jako materiály elektrod pro pseudokondenzátory se používají vodivé polymery nebo oxidy kovů.

- **Vodivé polymery**

Pseudokondenzátory s vodivými polymery mají relativně vysokou kapacitu a vodivost, plus relativně nízkou hodnotu ESR a jsou cenově srovnatelné s uhlíkovými elektrodami. Polymery mohou být typu N nebo P. Bohužel v dnešní době není dostatek vhodných materiálů pro elektrody typu N. Vodivé polymery, mají největší hustotu energie a výkonu. Mechanické namáhání vodivých polymerů během oxidačně redukčních reakcí snižuje

cyklickou stabilitu. Tato snížená životnost brání rozšíření pseudokondenzátorů s vodivými polymery.

- **Oxidy kovů**

Díky své vysoké vodivosti jsou oxidy kovů možným materiálem na elektrody pro pseudokondenzátory. Nejlepší výsledky podává oxid ruthenia, jelikož elektrody z něj vykazují vysokou kapacitu. Velikost kapacity dokonce překračuje velikosti uhlíkových a polymerových superkondenzátorů. Navíc mají také nižší hodnotu ESR oproti ELDC. Proto pseudokondenzátory s elektrodami z oxidu ruthenia jsou schopny dosáhnout vyšších výkonů a hustot energie než podobné EDLC a pseudokondenzátory. Nicméně, navzdory tomuto potenciálu, úspěchu oxidu ruthenia brání jeho vysoká cena.

1.4.4. Hybridní kondenzátory

Hybridní kondenzátory se pokouší využívat výhody a zmírnit nevýhody EDLC a pseudokondenzátoru. Využívají oba jevy faradický a ne-faradický k ukládání elektrického náboje. Hybridní kondenzátory dosahují energetické hustoty a výkonů větší než EDLC bez snížení počtu cyklů a dostupnost, které omezují úspěch pseudokondenzátorů. Další rozdělení je dále dle druhu elektrod.

- **Kompozitní**

Kompozitní elektrody se skládají z části založené na uhlíku spolu s vodivým polymerem nebo oxidem kovu, takže na jedné elektrodě se ukládá energie jak faradicky ta i ne-faradicky. Uhlíková část poskytuje velkou velikost povrchu, pseudokapacitní materiály jsou schopny dále zvýšit kapacitu složené elektrody skrze faradické reakce.

Díky rozložení ukládaného náboje se snížilo namáhání polymeru při nabíjení a vybíjení, proto tyto kompozitní materiály byly schopny dosáhnout cyklické stability srovnatelné s EDLC.

- **Asymetrické**

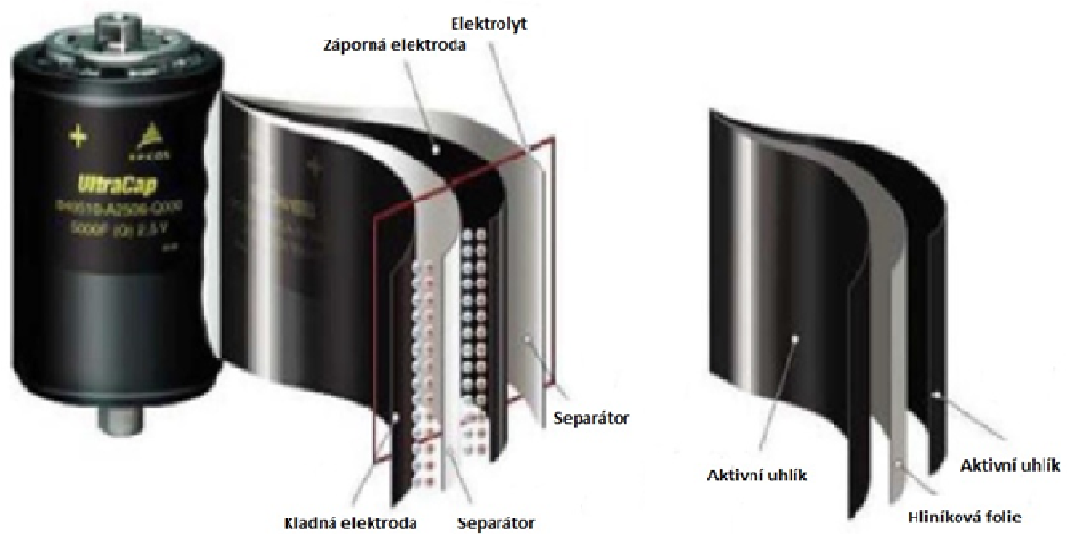
Asymetrické hybridy kombinují faradické a ne-faradické proces. Jedna elektroda je vyvedena jako EDLC a proti ní je elektroda pseudokapacitoru. Tímto se obcházejí problémy s elektrodou typu N u pseudokapacitorů. Elektroda typu N je v provedení ELDC. Asymetrické hybridní kondenzátory dosahují vyšší hustoty energie a výkonu než porovnatelné EDLC. Také mají vyšší cyklickou stabilitu oproti srovnatelným pseudokondenzátorům.

- **Bateriové**

Jako asymetrické hybridy, tak bateriové hybridy mají dvě různé elektrody. Sdružují v sobě elektrodu superkondenzátoru spolu s elektrodou baterie. Toto spojení odráží požadavek na vyšší hustotu energie superkondenzátoru a vyšší výkony baterie. Zkombinováním se dosáhlo výkonu a počtu cyklů srovnatelných s bateriemi a nabíjecích časů superkondenzátorů. Tyto hybridy jsou spojnicí mezi bateriemi a superkondenzátory.

1.4.5. Konstrukce

Celá struktura z obrázku 1.13. je provedena jako tenká folie a ta je stočena do válce. Toto se provádí kvůli další maximalizaci kapacity. Mimo to, ale toto provedení způsobuje to, že provozní napětí superkondenzátoru se pohybuje okolo 3V.



Obr. č. 1.13: Konstrukce superkondenzátoru [3]

Pro většinu aplikací je toto napětí příliš nízké, proto se jednotlivé superkondenzátory spojují do baterií. Napětí na jednotlivých člancích se rozkládá dle jejich kapacit. Pokud by měly články jinou kapacitu, nabily by se články s nižší kapacitou na vyšší napětí a články s vyšší kapacitou na nižší napětí. Navíc u každého článku dochází k samovolnému vybíjení zbytkovým proudem přes vnitřní odpor. Čím je zbytkový proud vyšší, tím nižší je napětí na článku a naopak. Takto může dojít k překročení dovoleného napětí na článku a může dojít k jeho destrukci.

Proto je nutné regulovat napětí na jednotlivých člancích. Nejjednodušší možností připojit ke každému paralelně rezistor. Tímto rezistorem protéká několikanásobně vyšší proud, než je zbytkový proud článku. Čím vyšší je poměr mezi proudem v rezistoru a zbytkovým proudem tím rychleji dochází k vyrovnání napětí. V případě poměru 10 : 1 může trvat až několik dní, v případě poměru 100:1, k vyrovnání dojde za několik hodin. Zapojení rezistorů k sériově spojeným superkondenzátorům je metoda pasivní. V případě metody aktivní, jsou k článkům připojeny proměnné odpory, obvykle pulzně spínané odpory. Velikost odporu je pak řízena skutečným napětím na člancích.

1.4.6. Aplikace superkondenzátorů

Superkondenzátory jsou vhodné pro celou řadu aplikací. Ať už pro ty co požadují dodávání krátkodobých pulzů s vyšší energií až po ty co vyžadující dlouhodobou energetickou podporu. Setkáme se s nimi jako součást UPS systémů, ve výkonové elektronice či klasických, elektrických a hybridních vozidlech.

V případě elektrických vozidel umožňují superkondenzátory zvýšený dojezd a prodloužení životnosti baterie díky snížení zatížení baterie a účinnější rekuperaci energie. Superkondenzátory mohou akumulovat brzdou energii a tím omezovat jinak vysoké nabíjecí proudy do baterie. Jejich aplikace také může zlepšovat možnosti akcelerace vozidla.

U UPS systémů dodávají superkondenzátory krátkodobou energetickou podporu. Kvůli nižší schopnosti akumulace energie není superkondenzátor plnohodnotnou náhradou baterie jako dlouhodobého zdroje energie. Nicméně je vhodný k vykrývání energetických výpadků. Mimo to také pohlcuje energetické vlny a špičky.

1.5. Srovnání akumulátorů

Při srovnání energetické hustoty a měrného výkonu je vidět, že se všechny prakticky používané akumulátory částečně překrývají. Akumulátor je třeba volit nejen dle energií a výkonů, ale hlavně kvůli ostatním vlastnostem, jednotlivých zařízení.

Pro snadné srovnání jednotlivých akumulátorů je uvedena tabulka 1. Tyto akumulátory jsou pro železniční vozidla. Z tabulky vyplívají následující skutečnosti.

Baterie trpí omezenou dobou života, ale mají velkou kapacitu. Tu sice nemůžeme všechnu využít, ale i tak mají nejvyšší hustotu energie. Vhodným řízením nabíjení a lze jejich životnost prodloužit. Častým vybíjením a nabíjením trpí a proto nejsou ideálním akumulátorem brzdě energie. Baterie se hodí pro trasy, kde jsou delší úseky bez možnosti napájení

Moderní MLC setrvačníky jsou ve srovnání se superkapacitory z hlediska hmotností, objemu a životnosti lepší. Bohužel omezují je nároky na bezpečnost, údržbu, ale hlavně trpí

značným samovybíjením. Je vhodné je použít pro akumulaci brzděné energie, v aplikaci kde neočekáváme dlouhé zastavení vozidla.

Tab. 1.1: Srovnání trakčních akumulátorů [5]

	Li-Ion baterie	MLC setrvačnick	Superkondenzátorová baterie
Celková hmotnost [kg]	4000	800	4000
Celkový objem [m ³]	3.8	0.28	8
Trvalý výkon [MW]	1	1.3	1
Doba dodávání trvalého výkon [s]	300	41.5	30
Využitelná energie [kWh]	83.3	15	8,33
Měrný výkon [W/kg]	400	1625	500
Měrná energie [Wh/kg]	80	25	5,5
Maximální uložitelná energie [kWh]	225	20	7
Dojezd při rychlosti 60km/h [km]	5	0.69	0.5
Cyklická stabilita	>3k	10M	>1M
Míra vybití při jednom cyklu [%]	42%	75%	50%
Údržba	žádná	nízká	žádná
Ekologičnost	vysoká	velmi vysoká	vysoká
Nebezpečí při provozu	kontrolované	kontrolované	nízké
Pracovní teploty [C°]	-20 to +40	-40 to +55	-20 to +40
Účinnost [%]	90	98	>90

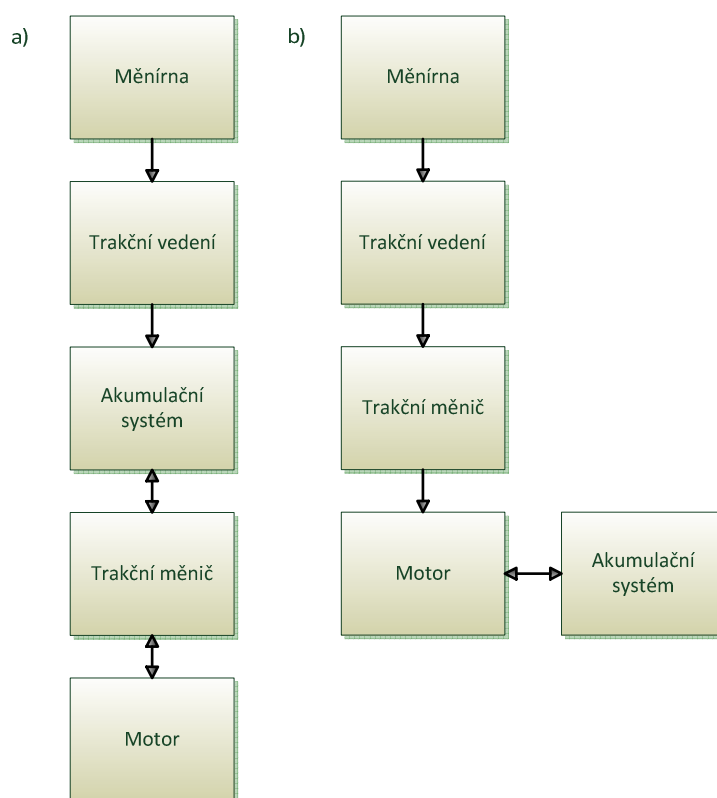
Superkondenzátory se vyznačují vysokým měrným výkonem a životností. Navíc netrpí tak vysokým samovybíjením, jako setrvačnický a jsou bezpečné a bezúdržbové. Bohužel mají nízkou energetickou hustotu. Jsou vhodné pro akumulaci menšího množství brzděné energie a dlouhé zastavení např. potřeby MHD.

2. Akumulační systémy se superkondenzátorem

Ve své práci jsem se rozhodl zpracovávat akumulční systémy se superkondenzátorem. Konkrétně jejich aplikaci v podmínkách drážních vozidel MHD.

Pro většinu aplikací musí být superkondenzátory vybaveny elektronickým měničem. Obvykle z důvodu, že napětí superkondenzátoru je jiné než napětí dané aplikace, proto je nutné přizpůsobení napětí superkondenzátoru a systému. Obzvláště pokud se jedná o pohony s rychlostní regulací.

Tyto měniče bývají připojeny přímo na DC meziobvod (viz. obrázek 2.1-a). Další možností je přímé připojení k zátěži (viz. obrázek 2.1-b). Výhodou přímého připojení k zátěži je vyšší celková účinnost. Nevýhodou je však složitější řízení.

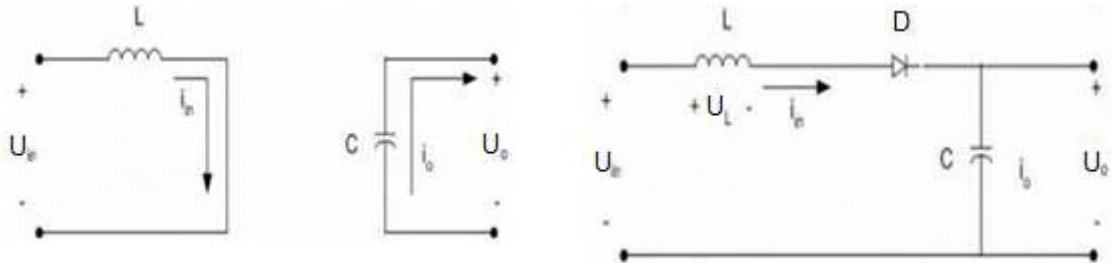


Obr. č. 2.1 Blokové schéma toku energie simulovaného systému

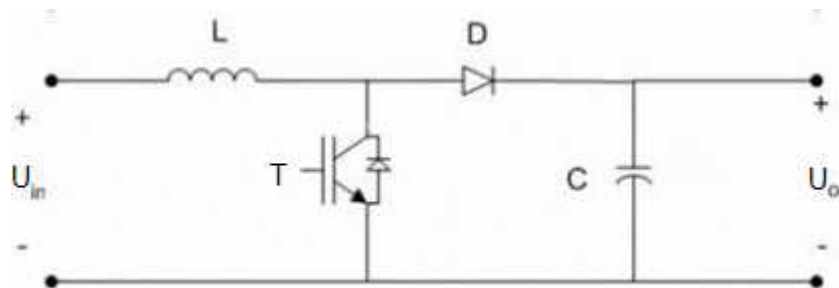
2.1. Zvyšovací měnič

Tento měnič je také známý jako step-up měnič a setkáme se s ním v aplikacích s nízkými výkony. Schéma měniče je na obrázku 2.2. Funkce toho měniče je popsána následovně, ve

stavu kde je tranzistor T sepnut, dioda D nevede a odděluje výstupní stranu měniče od vstupní. V tomto okamžiku je nabíjena indukčnost L. Ve chvíli kdy tranzistor T vypne, výstup je nabíjen z induktoru. Princip je patrný na obrázku 2.3.



Obr. 2.2 Zvyšovací měnič [6]



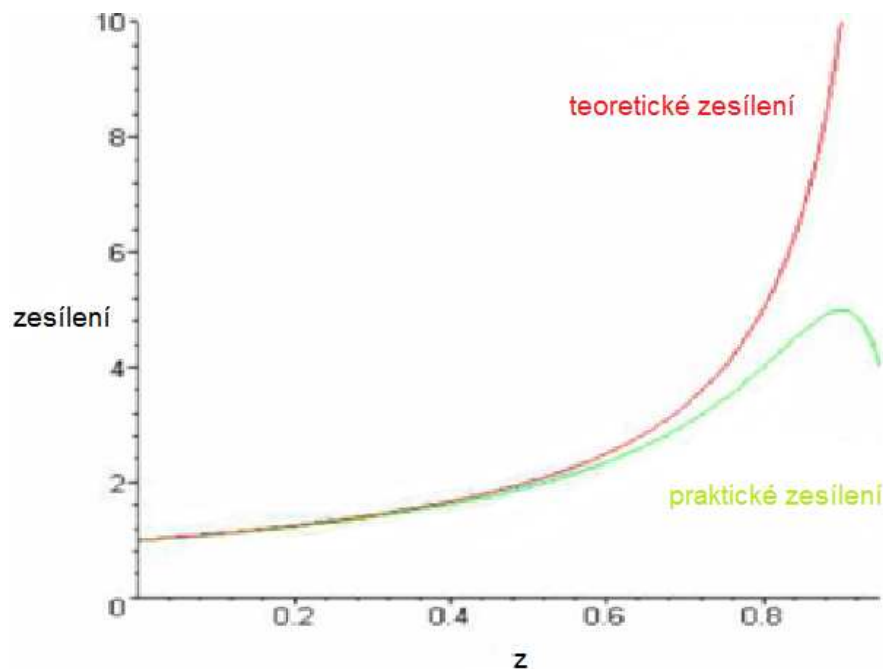
Obr. 2.3 Práce zvyšovacího měniče [6]

Velikost výstupního napětí závisí na poměrném sepnutí α . Kdy poměrné sepnutí je definováno vztahem 2.1, kde T je perioda spínání tranzistoru T a T_{on} je doba po kterou byl sepnut tranzistor T .

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.1)$$

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (2.2)$$

Výstupní napětí lze vypočítat ze vztahu 2.2. Můžeme si myslet, že takto můžeme dosáhnout vysokého výstupního napětí, v praktických aplikacích se, ale setkáváme většinou s dvojnásobným napětím na výstupu oproti vstupu, vyšší hodnoty jsou vzácné. To je způsobeno vzrůstem ztrát vznikajících na induktoru, diodě a tranzistoru a tím klesající účinnosti. Průběhy jsou znázorněny na obrázku 2.4.

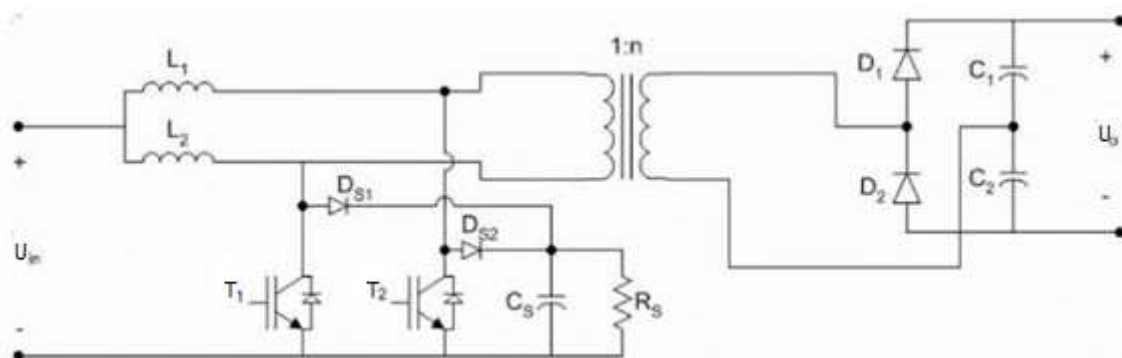


Obr. č. 2.4 Závislost napěťového zesílení zvyšovacího měniče na poměrném sepnutí [6]

Výhodou tohoto zapojení je, že nepotřebuje žádný transformátor a tranzistor není namáhaný velkými napětími oproti ostatním měničům. V případě, že je maximální napěťové zesílení dva až tři není potřeba galvanického oddělení.

2.2. Izolovaný zvyšovací měnič

Tento měnič je rozšířený konvenční zvyšovací měnič. V tomto případě jsou vstupní a výstupní strany konvertoru od sebe izolované transformátorem. Funkce transformátoru není jen izolační, ale poskytuje větší část zesílení měniče. Schéma měnič je na obrázku 2.5



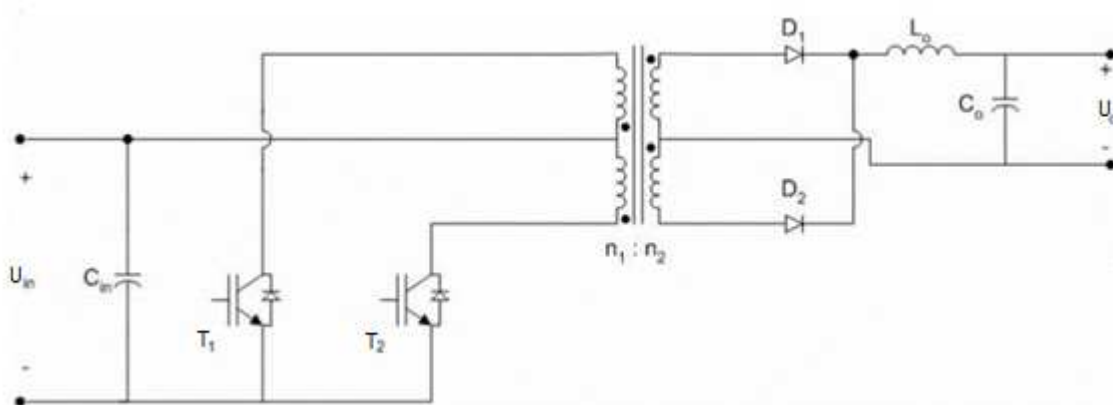
Obr. 2.5 Izolovaný zvyšovací měnič [6]

V podstatě se jedná o dva zvyšovací měniče zapojené paralelně. Tranzistory T_1 a T_2 jsou spínány ve střídavém pořadí, tím získáváme na přívodních svorkách transformátoru obdelníkový průběh napětí. Toto napětí je zesíleno transformátorem a následně usměrněno. Přestože většinu napět'ového zesílení poskytuje transformátor, tak indukory L_1 a L_2 poskytují malé zesílení, podobně jako u zvyšovacího měniče. Také tyto dva indukory dovolují měniči, aby nepřetržitě dodával energii, to redukuje špičkovou hodnotu proudu. Toto dělá tento měnič vhodným pro aplikace s vysokými výkony.

Na toto zapojení je potřeba vyšší počet součástek než na zvyšovací měnič, ale dosahuje také vyššího zesílení napětí.

2.3. Dvoučinný měnič

Na obrázku 2.6 je schéma dvoučinného DC-DC měniče. Tranzistory T_1 a T_2 jsou spínány ve střídavém pořadí, tím získáváme na přívodních svorkách transformátoru obdelníkový průběh napětí. Toto napětí je zesíleno vysokofrekvenčním transformátorem a následně usměrněno.



Obr. 2.6 Dvoučinný měnič [6]

Napětové zesílení dvoučinného měniče je závislé na poměrném sepnutí z . Výstupní napětí lze vypočítat dle vztahu 2.3.

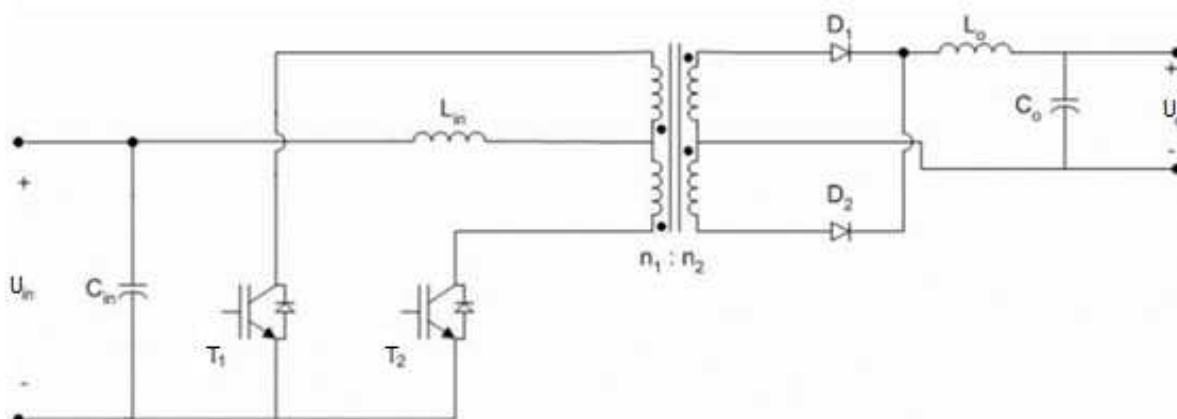
$$\frac{U_2}{U_{in}} = 2 \frac{n_1}{n_2} z \quad (2.3)$$

Kde z , je poměrné spínání tranzistorů T_1 a T_2 teoreticky maximální hodnota je 0.5. V praxi je tato hodnota nižší než 0,5. Což je způsobeno minimální dobou, která je nutná k obnovení izolační schopnosti tranzistoru, protože nemohou být sepnuty oba tranzistory současně. U tohoto typu měniče se nevyhne malému rozdílu mezi dobami sepnutí tranzistorů T_1 a T_2 , to vytváří nerovnováhu mezi jednotlivými proudovými špičkami. Tento měnič pracuje v režimu přerušovaných proudů, proto špičkové hodnoty proudu jsou vysoké.

Také je důležité zvážit napětové namáhání tranzistorů T_1 a T_2 . Ty jsou vystavené dvojnásobku vstupního napětí měniče. Toto není extrémně vysoká hodnota ve srovnání s ostatními měniči. Ale problémem je, že tranzistor musí vydržet vyšší špičkovou hodnotu proudu a vyšší hodnotu di/dt . Tento problém odstraňuje následující zapojení.

2.4. Dvoučinný měnič proudu

Topologie dvoučinného měniče proudu je v podstatě stejná jako u napětového, popsáném v předchozí kapitole. Liší se jen v induktoru na vstupní straně měniče, jak je vidět na obrázku 2.7. Díky tomuto induktoru je možné jít s z nad 0,5. Při z , vyšším než 0,5, měnič operuje v módu nepřerušovaných proudů, to snižuje špičkovou hodnotu proudů. Tohoto je dosaženo, protože jsou oba tranzistory po určitou dobu sepnuty současně.



Obr. 2.7 Dvoučinný měnič proudu [6]

Když jsou oba tranzistory sepnuty, vstupní proud lineárně roste a energie se ukládá ve vstupním induktoru. Když je sepnut je jeden z tranzistorů, tak vstupní napětí a akumulovaná energie ve vstupním induktoru napájí výstupní stupeň konvertoru. Proto je funkce tohoto měniče podobná jako u zvyšovacího měniče.

Během nepřerušovaného proudu, to je když je α z vyšší než 0,5, výstupní napětí lze vypočítat dle vztahu 2.4.

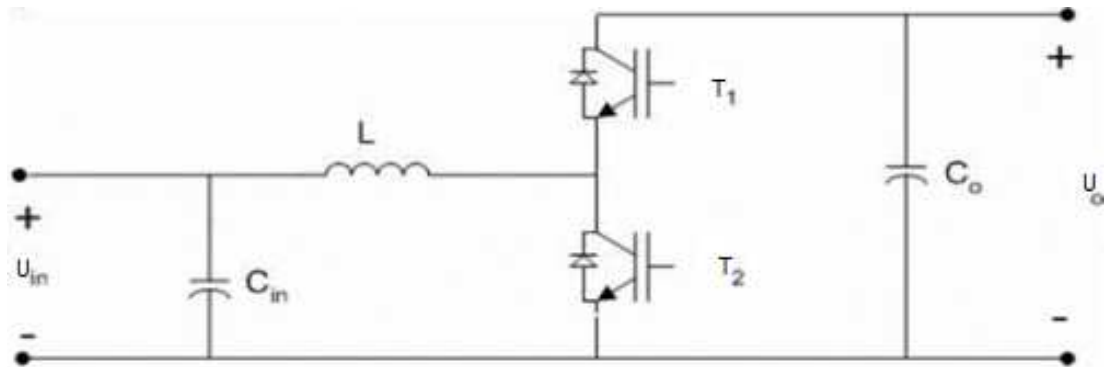
$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{n_2}{n_1} \frac{1}{2(1-\alpha)} \quad (2.4)$$

Tento typ měniče má nízký poměr mezi dosaženým výkonem a svou váhou, ve srovnání s předcházejícím. Také napěťové namáhání tranzistorů je více než dvounásobek vstupního napětí, v okamžiku kdy měnič pracuje s hodnotou α z nižší než 0,5. Výhodou je nižší hodnota špičkového proudu, v okamžiku kdy měnič pracuje v režimu nepřerušovaných proudů. To dělá tento DC-DC měnič vhodný pro aplikace s vysokými výkony.

2.5. Dvoukvadrantový pulzní měnič

Výhodou této topologie je, že dovoluje, na rozdíl od těch zmíněných v předchozích kapitolách, obousměrný tok energie, což znamená, že energie může proudit ze zdroje energie do superkondenzátoru a zpět ze superkondenzátoru ke zdroji energie. Toto je velká výhoda pro využití s akumulátory energie jako jsou baterie či superkondenzátory, protože dovoluje tyto akumulátory zároveň dobíjet, v okamžik kdy jejich energie není potřeba. Topologie toho měniče je na obrázku 2.8.

Tento měnič akumuluje energii dodávanou zdrojem v indukčnosti L během doby sepnutí T_2 . V okamžiku kdy je tranzistor T_2 vypnut, tak induktor dodává energii do zátěže skrze antiparalelní diodu tranzistoru T_1 . V okamžiku, kdy je zapotřebí opačný směr energie, je sepnut tranzistor T_1 a proud teče ze zátěže do zdroje energie.



Obr. 2.8 Dvoukvadrantový pulzní měnič [6]

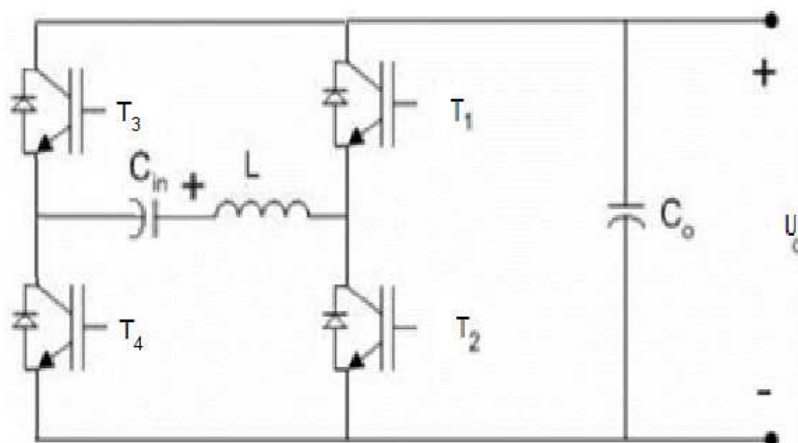
Napětí měniče závisí na hodnotě z . Lze vypočítat dle vztahu 2.5.

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{z}{1-z} \quad (2.5)$$

Jako u zvyšovacího měniče tak i u této topologie nepřesáhne výstupní napětí trojnásobek vstupního. Toto může být odstraněno zařazením dalšího měniče do kaskády.

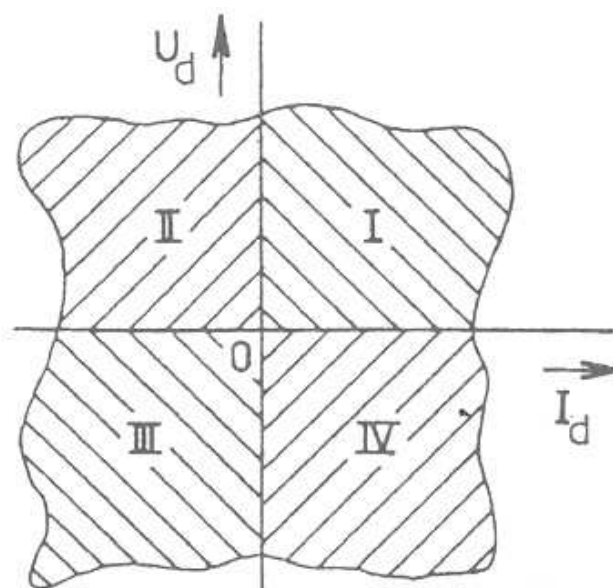
2.6. Čtyřkvadrantový pulzní měnič

Tento měnič je podobný dvoukvadrantovému, v zapojení přibyla jedna větev tranzistorů. Patrné na obrázku 2.9.

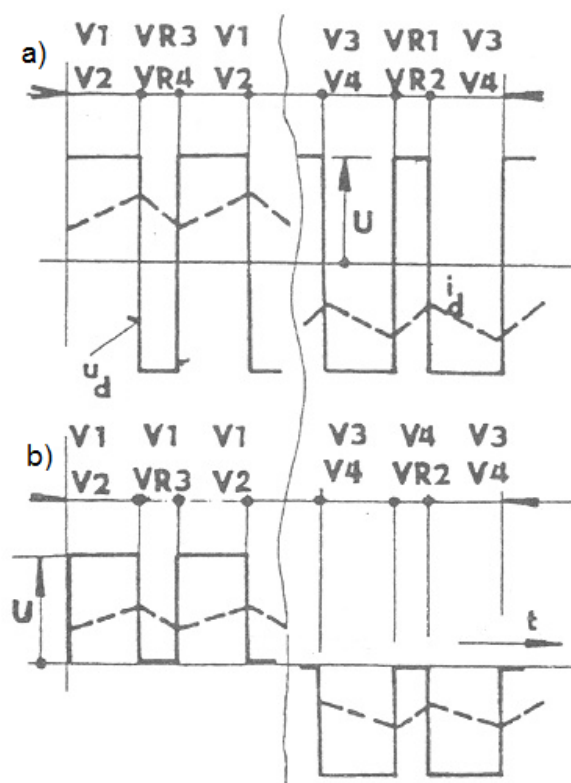


Obr. 2.9 Čtyřkvadrantový pulzní měnič

Na rozdíl od dvoukvadrantového pulzního měniče umožňuje pracovat ve všech čtyřech kvadrantech V - A charakteristiky, vyobrazeno na obrázku 2.10. Tedy dokáže nabíjet a vybíjet superkondenzátor i v okamžiku kdy klesne napětí stejnosměrného meziobvodu pod napětí superkondenzátoru. Což může nastat jednak výkyvy napětí na síti nebo tím že postavíme superkondenzátor na vyšší napětí než je napětí meziobvodu.


 Obr. 2.10 Kvadranty V - A charakteristiky [7]

Za chodu je potřeba sledovat napětí superkondenzátoru a stejnosměrného meziobvodu a v případě potřeby měnit logiku spínání. Na obrázku 2.11 je znázorněno spínání tranzistorů pro práci měniče v 1. a 3. kvadrantu.



Obr. 2.11 Spínání čtyřkvadrantového pulzního měniče [7]

Kde varianta vlevo je pro 1. kvadrant a vpravo pro 3. V praxi se používá častěji varianta b), která zajišťuje nižší zvlnění napětí na zátěži.

Složitější řízení a vyšší počet spínacích součástek jsou hlavními nevýhodami tohoto měniče. Jeho nejvyšší výhodou je, že umožňuje pracovat se superkondenzátory o vyšších napětích. Vyšší napětí zajišťuje nižší výkonové ztráty při provozu, proto jsou tyto měniče vhodné pro vysoké výkony.

2.7. Napájení

Napájení je z 12 pulzního zdroje napětí, o napětí 660V_{RMS} při nezatížené troleji. Kdy není možné brzdou energií napájet jiné vozidlo, či vracet ji do nadřazené sítě. V podmínkách MHD je tento jev častý u tyristorových napájecích stanic. Aby zde bylo možno rekuperovat, musí být přítomny dvě vozidla na jednom napájeném úseku, ty bývají přibližně 1400m dlouhé.

Tab. 2.1: Napětí trakční napájecí sítě

Minimální dovolené napětí	400V
Provozní napětí	600V
Napětí naprázdno	660V
Maximální dovolené napětí	900V
Reakce přepěťových ochran	950V

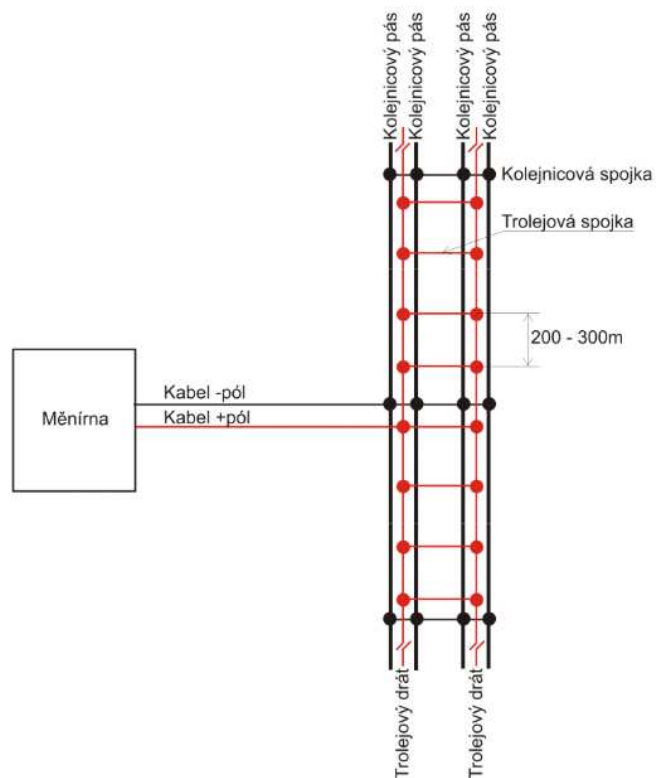
2.8. Vedení

Pro účely simulace je uvažována kombinace kabelového a venkovního vedení. Délka kabelového vedení od napájecí stanice je uvažována jeden kilometr a délka venkovního vedení je 1400m. Praktická realizace trolejového vedení je znázorněna na obrázku 2.12.

Tab. 2.2: Elektrické parametry uvažovaného vedení

	Měrný odpor [Ω /km]	Měrná kapacita [nF/km]	Měrná indukčnost [mH/km]
Venkovní vedení	0,08	16,8	0,62
Kabelové vedení	0,13	2,48	0,82

Venkovní vedení je napájeno z jeho středu, proto je model rozdělen na dvě paralelní větve. Na jedné větvi je umístěna zátěž (model tramvaje) a druhá je nezatížena. Během simulace je uvažován po celou dobu nejnepříznivější stav, kdy je tramvaj na konci napájeného úseku.



Obr. 2.12 Trolejové vedení

2.9. Vozidlo

Vozidlem je pětičlánková tramvaj určená pro 300 cestujících. Tramvaj má tři typy brzd elektrohydraulickou, elektrodynamickou a elektromagnetickou kolejnicovou brzdou. Hlavní provozní brzdou je elektrodynamická brzda, která umožňuje rekuperaci elektrické energie při brzdění.

Tab. 2.3: Parametry vozidla

Napětí	600 V
Max. proud trakce	1200 A
Max. napětí brzda	900 V
Max. proud brzda	1250 A
Účinnost motoru	90%
Účinnost měniče	90%
4x Trakční asynchronní motor	220kW
Délka (bez spřáhel)	32m
Šířka	2 650mm
Rozchod	1 435mm
Hmotnost vozidla	68tun
Vstupní tlumivka	4mH
Vstupní kapacita	6,9mF

2.10. Měnič

Měničem je dvoukvadrantový pulzní měnič sestavený z tranzistorů IGBT. Pokud by byl použitý superkondenzátor určen pro vyšší napětí, byl by zapotřebí měnič čtyřkvadrantový, jelikož je nutné zajistit nabíjecí a vybíjecí činnost měniče ve stavech kdy je napětí superkondenzátoru vyšší než napětí vstupního filtru a naopak. Pro zvyšování napětí byla použita tlumivka o indukčnosti 5 mH.

Měnič elektrického pohonu figurující jako zátěž a případně zdroj, při rekuperaci, byl nahrazen pro zjednodušení říditelným zdrojem proudu.

2.11. Superkondenzátor

Superkondenzátorem je baterie superkondenzátorů HTM125 od firmy Maxwell Technologies. Je konstruována na napětí 125V a je určena pro elektrickou trakci např. pro hybridní autobusy, nákladní automobily, dráhy městské a důlní, stavební a přístavní jeřáby.

Modul je vybaven systémem vyrovnávání napětí, monitorování a řízení teploty, nabíjení a vybíjení. Samozřejmostí je vysoká spolehlivost a dlouhá životnost. Modul HTM je certifikován pro veřejnou dopravu dle norem 72/245/EC a UN10.03.



Obr. 2.13 Maxwell Technologies HTM125 [8]

Pro účely simulace je nutné znát elektrické parametry. Ty jsou shrnuty v následující tabulce 2.4.

Tab. 2.4: Elektrické parametry HTM 125 [8]

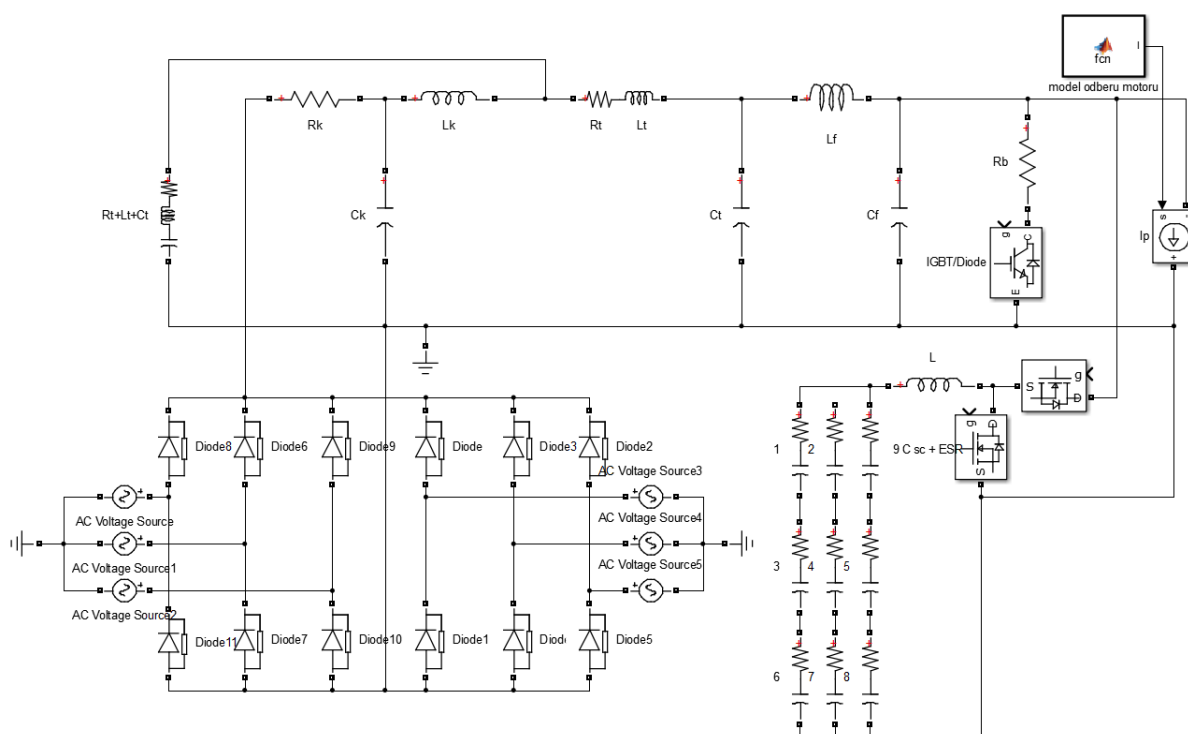
Minimální počáteční kapacita	63F
Maximální počáteční ESR	18m Ω
Jmenovité napětí	128V
Maximální napětí	136V
Maximální trvalý proud ($\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$)	140A _{RMS}
Maximální trvalý proud ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$)	240A _{RMS}
Maximální špičkový proud po 1 sekundu	1,900A
Maximální samo-vybíjecí proud	10mA
Maximální sériově připojené napětí	1500V

Celkem je počítáno s nasazením devíti supekondenzátorů s celkovým napětím 375V. Jsou zapojeny tři superkondenzátory sériově ve třech paralelních větvích.

Takto si mohu dovolit 3x vyšší proudy, protože výsledný proud se rozdělí do třech jednotlivých větví a výsledný proud jednou baterií bude oproti celkovému roven třetině. Tímto je umožněno delší proudové přetěžování v okamžiku brzdy a dobíjení superkondenzátorů na vyšší napětí.

3. Simulace

Simulace systému akumulace energie byla provedena v programu Matlab/Simulink. Konkrétně byla simulace provedena pomocí knihovny Simscape/SimPowerSystems. Tato knihovna je specializována na výkonovou elektroniku. Délka simulace je 60s s krokem 0,0001s. Na obrázku 3.1 je vyobrazeno simulované schéma skládající se z prvků popsanych v předchozí kapitole.



Obr. 3.1 Simulované schéma

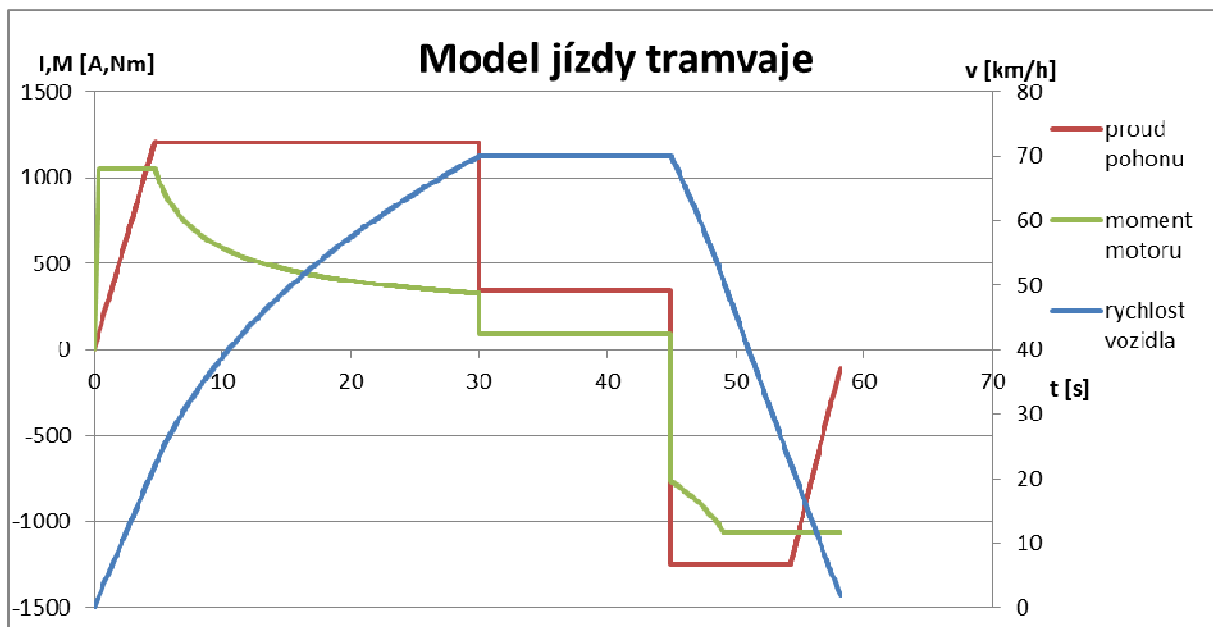
Pro bezpečnou práci akumulčního systému, je potřeba zajistit logiku řízení a regulaci výkonu. Regulace výkonu ze superkondenzátoru, je provedeno jako zpětnovazební řízení proudu, kde je zadáván požadavek na výstupní proud superkondenzátoru.

3.1. Jízdní data

Jako modelové vozidlo je uvažována tramvaj na rovinné trati dlouhé 800m. V první části nazvané START pohon tramvaje lineárně zvyšuje proud a tramvaj se rozjíždí s konstantním momentem. V době nazvané AKCELERACE následuje rozjezd s konstantním proudem. Po té následuje JÍZDA, kdy vozidlo udržuje svou rychlost. V části BRZDA je

tramvaj bržděná maximálním proudem. Na závěr jízdy je pojmenován ZASTAVENÍ v té proud klesá k nule. Tramvaj není bržděná jen elektrodynamickou brzdou, ale také i brzdou mechanickou.

Tato jízda byla vedena na hranici možností vozidla. Po většinu doby jsme na mezních parametrech měniče a vozidlo jede maximální rychlostí.



Obr. 3.2 Jízdní data tramvaje

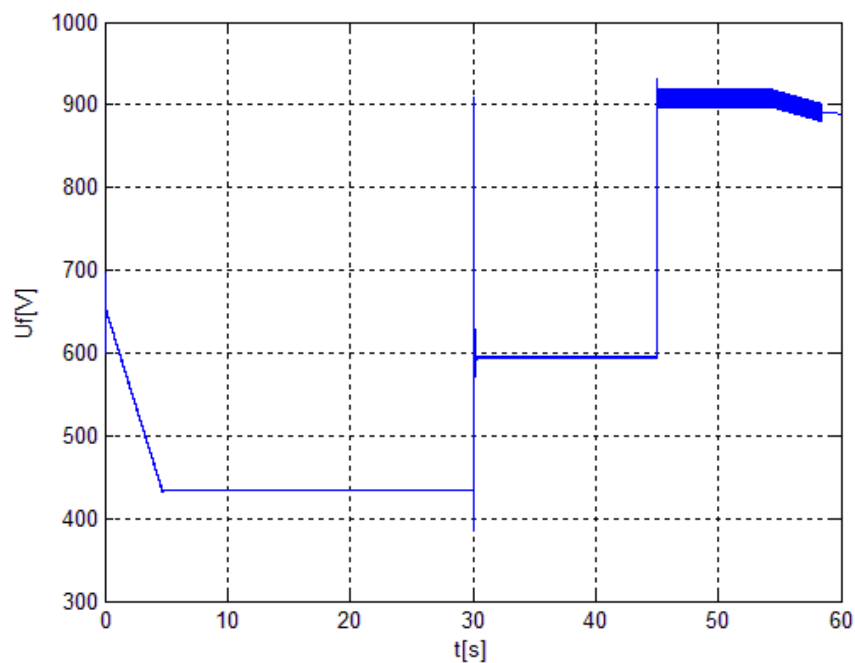
Uvedená data byla naměřena při testovacím provozu reálné tramvaji. Daty o proudu pohonu je ovládán říditelný zdroj proudu. Ostatní průběhy jsou ilustrativní.

Tab. 3.1: Shrnutí jízdy

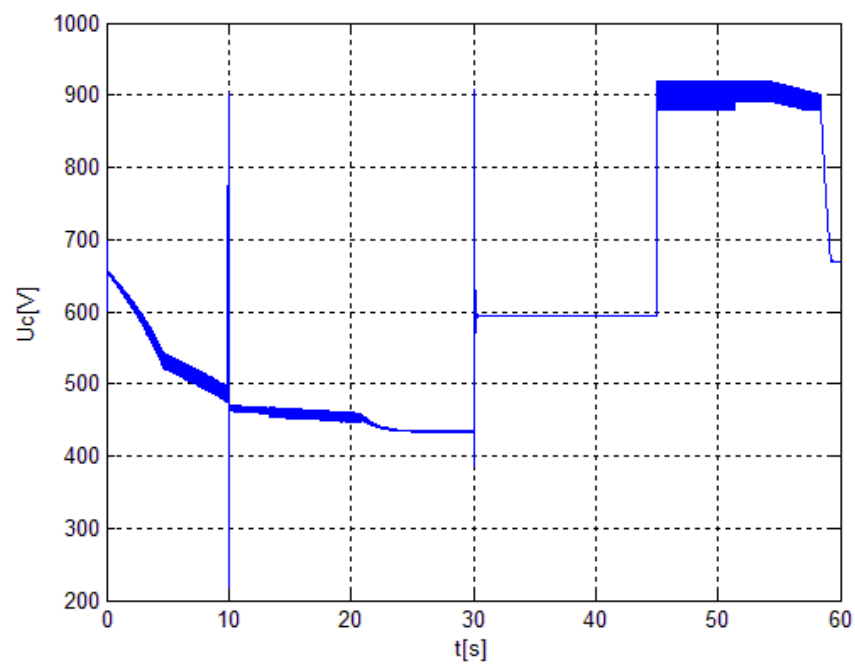
Jízda	Čas na trase 800m
START	0- 4,8s
AKCELERACE	4,8-30s
JÍZDA	30-45s
BRZDA	45-49s
ZASTAVENÍ	50-58,3s
Střední rychlost	49,25 km/h
Maximální rychlost	70 km/h

3.2. Měření veličiny

Srovnávají jsou průběhy napětí a proudů ze simulace kdy vozidlo nebylo vybaveno superkondenzátorem s průběhy vozidla jež bylo superkondenzátorem vybaveno bylo. Na závěr jsou uvedeny veličiny naměřené v samotném obvodu superkondenzátoru.

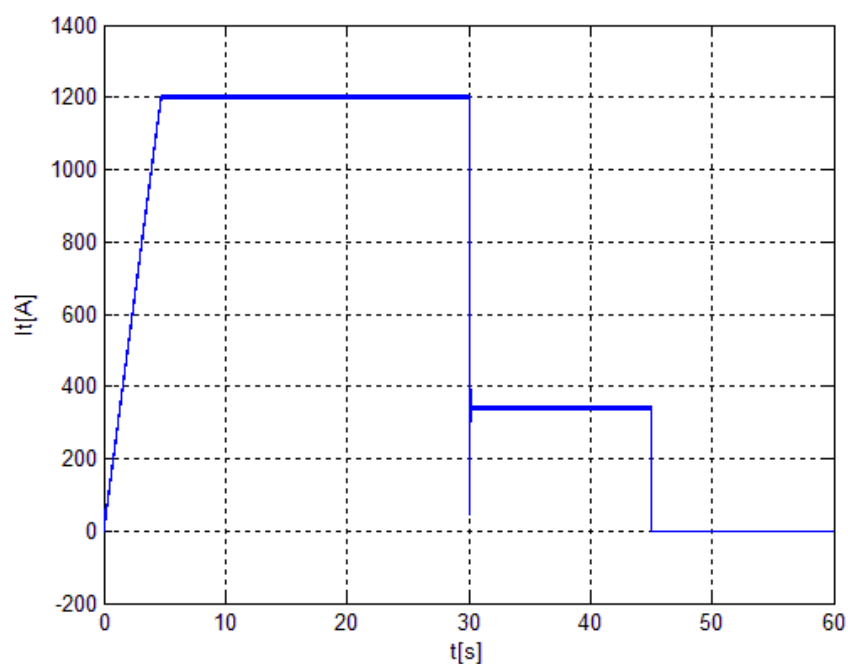


Obr. 3.3 Napětí vstupního kondenzátoru vozidla bez SC

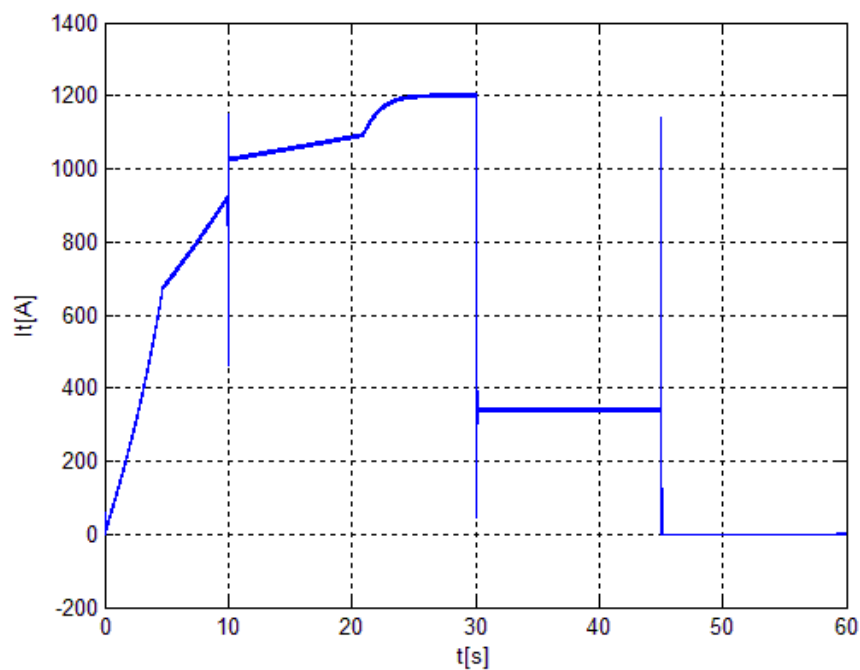


Obr. 3.4 Napětí vstupního kondenzátoru vozidla vybaveného SC

Z obrázků 3.3 a 3.4 je patrné že činnost superkondenzátoru, způsobila snížení poklesu napětí, až do doby kdy byl superkondenzátor vybit.

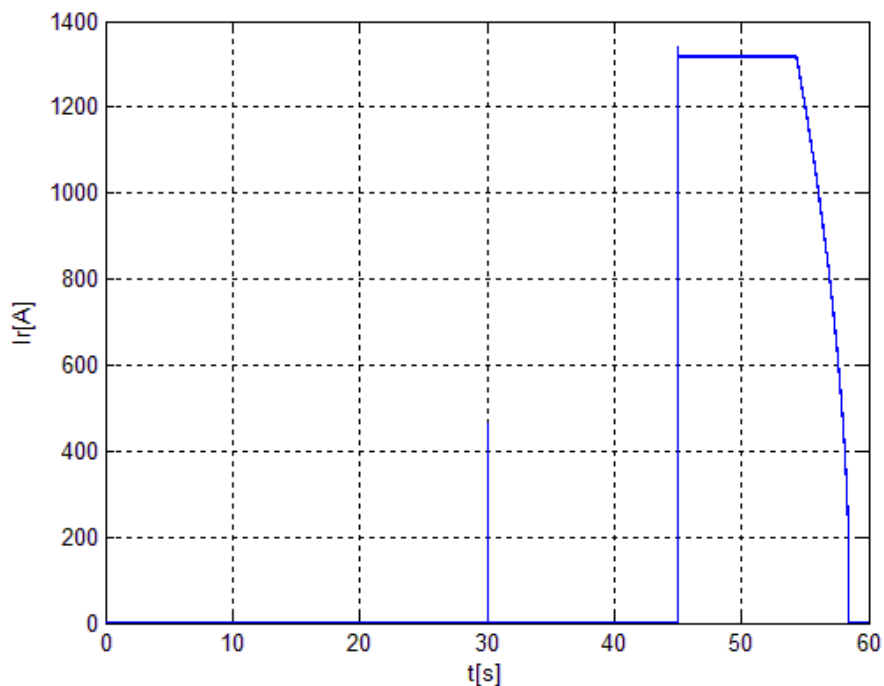


Obr. 3.5 Odebíraný proud vozidla bez SC

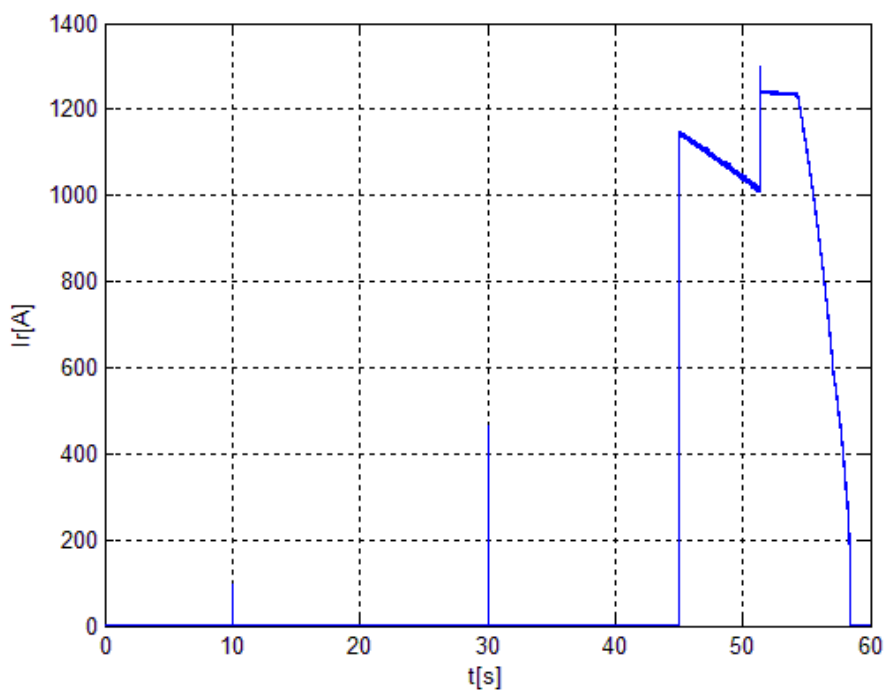


Obr. 3.6 Odebíraný proud vozidla vybaveného SC

Při porovnání obrázků 3.5 a 3.6, je patrné, že jak strmost nárůstu proudu, tak i celkový proud jsou u vozidla vybaveného superkondenzátorem nižší.

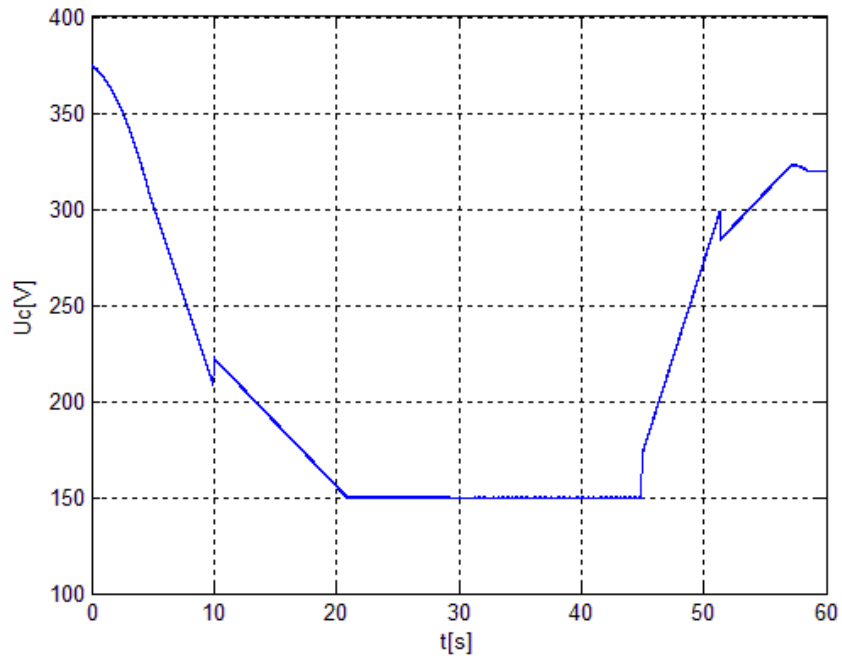


Obr. 3.7 Proud odporníkem vozidla bez SC

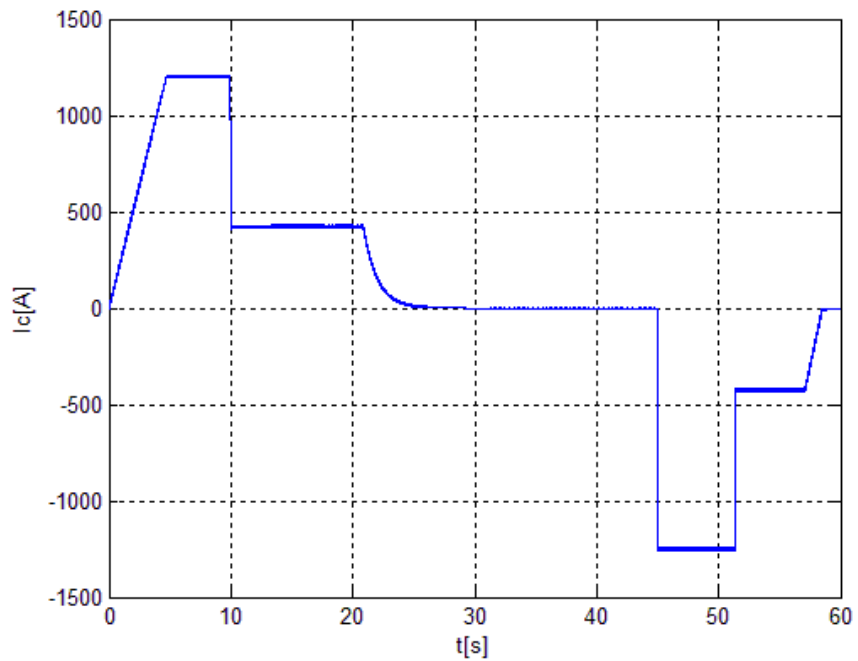


Obr. 3.8 Proud odporníkem vozidla vybaveného SC

Při porovnání obrázků 3.7 a 3.8, je patrné, že proudu odporníkem u vozidla vybaveného superkondenzátorem je snížený o akumulovanou energii v superkondenzátoru.



Obr. 3.9 Napětí superkondenzátoru



Obr. 3.10 Proud superkondenzátoru

Na obrázku 3.9 je superkondenzátor je vybíjen z 375V na 150V. V době brzdy je nabit ze 150V na 320V. Skokové změny jsou způsobeny omezením proudu. To je velmi dobře patrné na obrázku 3.10.

Hlavním limitem pro efektivnější akumulaci energie je proudové omezení, jež neumožňuje za stávajících podmínek opětovné nabití na plné napětí.

3.3. Podmínky

Je nutné sledovat napětí superkondenzátoru, jednak se nesmí přebíjet, aby nedošlo k jeho zničení, zároveň nesmí být příliš vybíjen. V simulaci je superkondenzátor vybíjen až na napětí 150V, což je 16% kapacity energie. V případě úplného vybití by při opětovném nabíjení mohlo docházet k velkým proudovým špičkám.

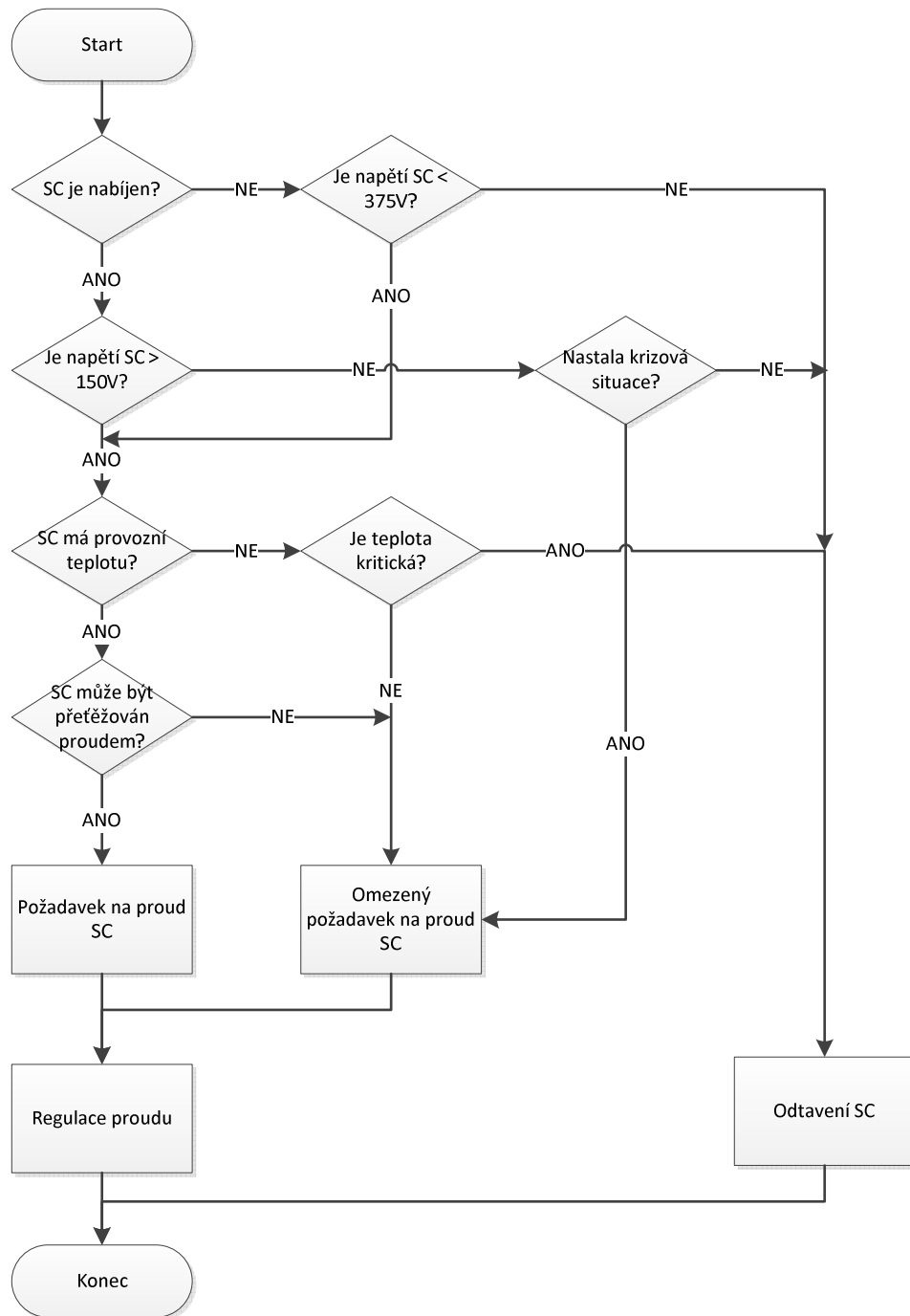
Ponechání části energie v rezervě je také vhodné z hlediska bezpečnosti dopravy. Při výpadku napájení může být zbytek energie použit k dojetí se sníženým výkonem do zastávky či opuštění potenciálně nebezpečných míst jako jsou křižovatky, mosty nebo tunely.

Nutné je také sledovat teplotu superkondenzátoru. Pokud je vlivem provozu nebo prostředí překročena provozní teplota, dochází k omezení maximálních možných proudů. Za situace, kdy ani toto nestačí a teplota překročí nebezpečnou mez, je superkondenzátor odstaven z provozu.

Největší výhodou superkondenzátoru je možnost jeho krátkodobého přetěžování, aby nedošlo k jeho poškození je sledováno proudové množství. Když tato hodnota překročí 1900As je maximální možný proud limitován na 140A.

Odstavení z provozu je realizováno jako blokování pulzů k tranzistorům měniče. V případě práce na zařízení je nutné nezapomenout na to, že superkondenzátor může být stále nabit, proto je vhodné ho kvůli bezpečnosti vybit. K tomuto účelu je nejsnadnější použít brzdový odporník. Při opětovném uvedení do provozu nabijeme superkondenzátor konstantním proudem na požadovanou hodnotu napětí.

Logiku řízení shrnuje vývojový diagram na obrázku 5.1.



Obr. 3.11 Vývojový diagram podmínek pro řízení superkondenzátoru

3.4. Hodnocení

Při jízdě se zpočátku vybitým kondenzátorem na 150V se superkondenzátor při brzdě nabíjí na 320V.

Při celkovém odběru energie z troleje 4,899kWh. Množství akumulované energie v superkondenzátoru je vypočítáno ve vztahu 4.1 a celková úspora energie ve vztahu 4.2.

$$E = \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot 63 \cdot 320^2\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot 63 \cdot 150^2\right)}{3600000} = 0,699 \text{ kWh} \quad (4.1)$$

$$\gamma = \frac{0,699}{4,899} = 14,2\% \quad (4.2)$$

Superkondenzátor je schopný akumulovat velké výkonové špičky, ale nedokáže účinně akumulovat velké proudy po delší dobu. To je způsobeno vlivem omezování proudu, bez něj by došlo ke zničení zařízení.

Návratnost investice tohoto systému je velmi spekulativní, je závislá na ceně energie pro dopravní podnik, na typu trakčního vozidla, profilu trati a také na hromadnosti nasazení tohoto systému. Například pro tramvaj typu Škoda 14T na lince č.4 v Plzni by byl velmi hrubý odhad návratnosti do 3 let, přičemž životnost superkondenzátoru by byla zhruba 6 let (při uvažování ceny elektrické energie 3Kč/kWh, poloviční obsazenosti vozidla, v provozu 16 hodin denně. [9])

3.5. Prediktivní řízení

Zvláště u vozidel MHD se setkáváme, že trasa je dopředu známa. To se týká nejen stoupání, ale také vytížení úseku případně „tvrdosti“ trakční sítě. Podle tohoto je možné řídit nabíjení a vybíjení akumulčního prvku.

Pokud vozidlo je očekáván úsek, kde často klesá napětí troleje, ať už vlivem velkých odběrů, stoupání či velké vytíženosti. Na předchozí trase je superkondenzátor v průběhu jízdy nabit na maximum a po přijetí do problémového úseku je superkondenzátor vybíjen a tím se předchází zhroucení napětí trakční napájecí sítě.

V opačném případě když vozidlo očekává dlouhé klesání, je superkondenzátor dopředu vybit ve prospěch práce, pohonu vozidla a také pomocných pohonů.

Pomocnými pohony se uvažuje např. kompresor vzduchu, kompresor klimatizace, nabíječ trakční baterie, vytápění. V případě stání je např. snaha o nabití baterie na maximum. Podobně je tomu tak i u ostatních pomocných pohonů.

Touto cestou je dosaženo další úspory energie. Akumulátor vybitý na své přípustné minimum může akumulovat vyšší množství brzdové energie, která by byla jinak mařena v brzdovém odporu.

Závěr

Akumulátorů elektrické energie existuje celá řada druhů, s nimiž se setkáváme klasicky v energetice, kdy jsou potřeba pro chod elektrizační soustavy. Nejčastěji jsou jimi přečerpávací vodní elektrárny, v menší míře zásobníky stlačeného vzduchu.

V souvislosti s průmyslovou elektronikou, dopravou a obnovitelnými zdroji energie, nabývají na vyšším významu akumulátory schopné akumulovat celkově menší množství energie, ale krátkodobě pracovat vysokými výkony. Těmi klasicky bývají baterie a v dnešní době stále častěji nasazované setrvačníky a superkondenzátory.

Se superkondenzátory se setkáváme v nejrůznějších aplikacích. Hlavně díky schopnosti akumulovat po krátkou dobu velké proudové špičky, v čemž vyniká nad ostatními akumulátory. Z tohoto důvodu jsou superkondenzátory vybaveny vozidla, jeřáby a systémy UPS.

Vzhledem k předchozímu zaměření studia na elektrická drážní vozidla jsem volil jako konkrétní případ řešení tramvaj vybavenou systémem akumulace brzdě energie. V tomto odvětví dominují výrobky firmy Maxwell technologies, jelikož splňují normy pro dopravní prostředky. Těmito superkapacitory jsou například vybavovány některé trolejbusy a hybridní autobusy.

Pro účel vyhodnocení úspory energie při provozu byla vypracována počítačová simulace. Jejím výsledkem byla úspora energie cca 14,2% na 800m dlouhé rovinné trati, kdy vozidlo dosahovalo svých limitních parametrů. Přičemž by hmotnost vozidla narostla cca o 600kg.

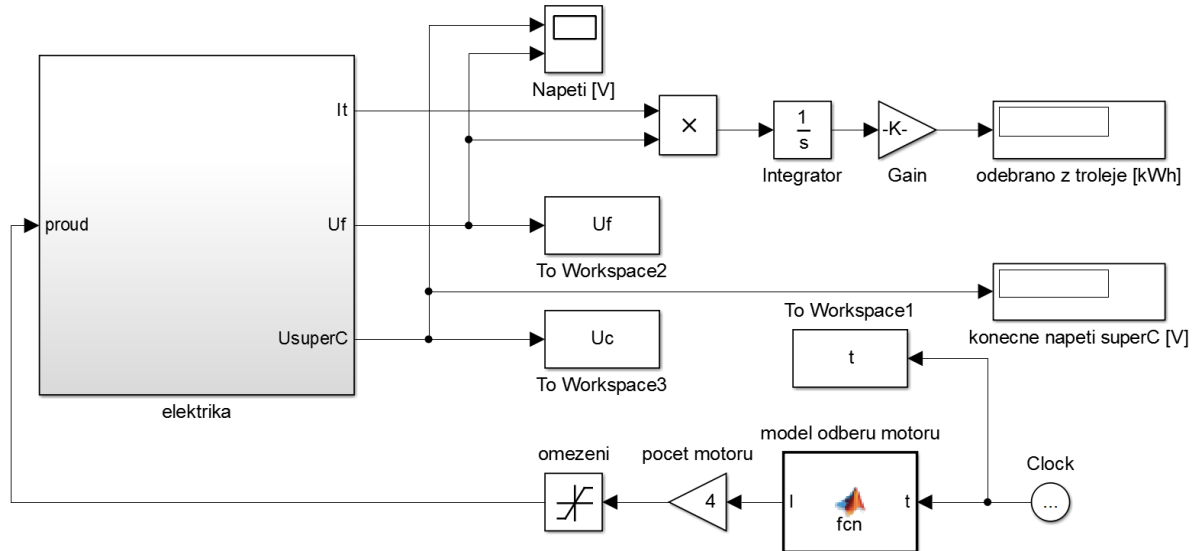
Pro rozhodnutí o rentabilitě tohoto systému jsou nejdůležitější cena energie a cena technologie akumulace. Pro dopravce je simulace je vodítkem, z něž by měl vycházet.

Seznam literatury a informačních zdrojů

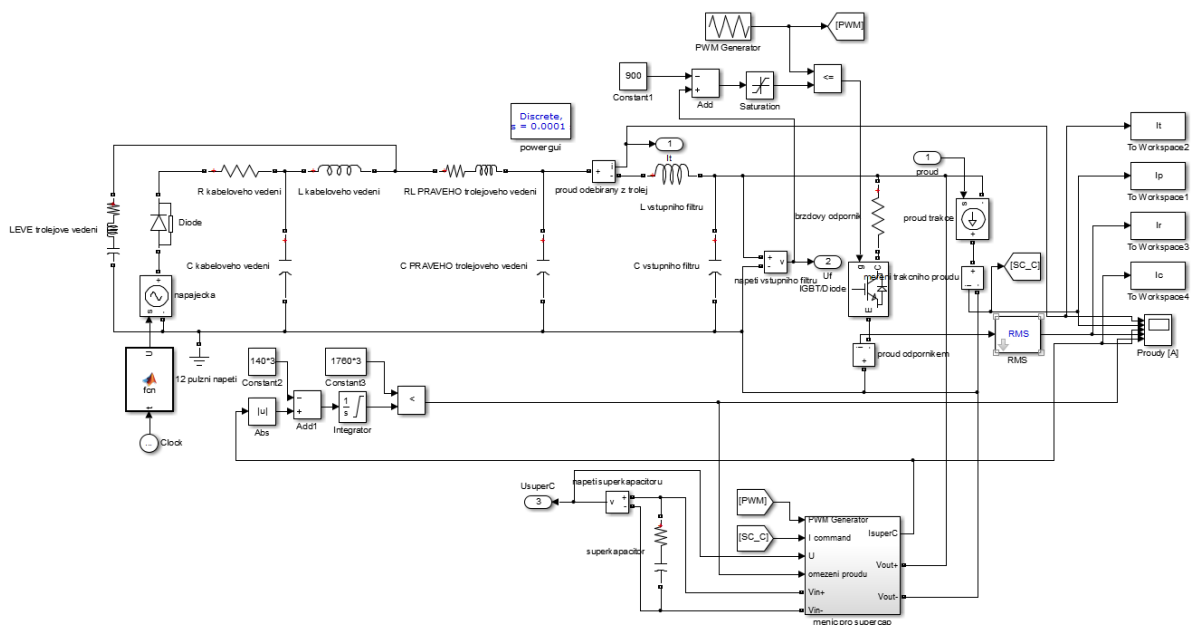
- [1] ČEJKA, Marek. *Sekundární chemické články - akumulátory*. Plzeň, 2008. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] SKUPINA ČEZ. *Kdejinde* [online]. 2008 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [3] MITRE. *Supercapacitors: A Brief Overview* [online]. 2006 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_06/06_0667/06_0667.pdf
- [4] Tbz info. *Tbz info* [online]. 2010 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>
- [5] ŠANTORA, Karel. *Akumulace energie na vozidlech*. Plzeň, 2004. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] FANJUL, Leonardo. *Some new applications of supercapacitors in power electronic systems*. Texas A&M University, 2003. Diplomová práce. Texas A&M University.
- [7] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika, svazek III*, Plzeň 2003
- [8] MAXWELL TECHNOLOGIES. *Datasheet 125V Heavy transportation modules* [online]. 2013-05-08 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/products/125v-tran-modules>
- [9] STREIT, Luboš. *Systém akumulace energie trakčního vozidla*, Plzeň 2008
- [10] MATHWORKS. *SimPowerSystems: User's Guide* [online]. 2013-05-08 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phymod/powersys/powersys.pdf

Přílohy

Příloha A – Model tramvaje vybavené superkondenzátorem v Simulinku



Příloha B – Subsystem elektrika



Příloha C – Subsystem měnič pro supercap

