

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Katedra elektrotechniky, elektroniky
a zabezpečovací techniky v dopravě

**VYUŽITÍ SUPERKAPACITORŮ V TRAKČNÍCH
POHONECH**

Bc. Vlastimil Duda

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vlastimil DUDA**
Osobní číslo: **D08781**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**
Název tématu: **Využití superkapacitorů v trakčních pohonech**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

- Úvod
- Analýza akumulace elektrické energie a následné srovnání jednotlivých typů akumulátorů
- Vlastnosti a možné způsoby využití superkapacitorů
- Návrh a dimenzace superkapacitoru pro reálný trakční pohon
- Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **Elsner V.:** Akumulace rekuperované energie v dopravě, VUT Brno, 2004
2. **Superkapacitory v dopravní technice,** Vědeckotechnický sborník ČD č.25/2008
3. **Dvořák P.:** Superkondenzátory s nanomateriály, diplomová práce, Brno: VUT, fakulta elektrotechniky a komunikační technologií, 2007
4. **Webové stránky a firemní literatura firmy Maxwell** (www.maxwell.com)

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce:

4. února 2010

Termín odevzdání diplomové práce:

24. května 2010



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2010

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 21. 5. 2010

Bc. Vlastimil Duda

Děkuji vedoucímu práce, panu Doc. Ing. Stanislavu Gregorovi, Ph.D., za jeho cenné podmínky, připomínky a podklady, které mi poskytl během zpracování této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat panu Josefu Vytlačilovi, mistru provozu Tr z Dopravního podniku města Pardubice za poskytnutí materiálů a informací.

TITUL

Využití superkapacitorů v trakčních pohonech

ANOTACE

Cílem mojí diplomové práce je návrh a dimenzace superkapacitoru pro reálný trakční pohon. Jako trakční pohon jsem zvolil trolejbus typ 28 Tr Solaris a to z toho důvodu, že se jedná o nejnovější typ vozu MHD, který jezdí i v Pardubicích od konce roku 2008.

Pro návrh superkapacitoru jsem zvolil úsek mezi Pardubicemi (zastávkou Dubina sever) a Počapelské Chalupy, jejichž vzdálenost činí 2 200 m. Tím nasimuluji akční rádius trolejbusu, tzn. že trolejbus nebude v tomto úseku poháněn elektrickou energií získanou z trolejového vedení, ale bude využívat naakumulovanou energii v superkapacitoru, která bude dodávána z rekuperačního obvodu.

V závěru této diplomové práce jsem provedl ekonomické zhodnocení výhodnosti superkapacitoru a Nikl–metalhydridové baterie NiMH, popřípadě zda by bylo ekonomicky výhodnější úsek pokrýt trolejovým vedením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Superkapacitor, trakční pohon, rekuperační obvod, akumulace energie

TITLE

Use supercapacitors in traction drives

ANNOTATION

The aim of my thesis is the design and dimensioning of supercapacitors for real traction drive. As the traction drive I chose a type of trolley bus 28 Tr Solaris from the Skoda company because it is the latest type of vehicle stop that uses the third drive phase asynchronous motor so called traction engine III. generation, which also runs in Pardubice from the end of 2008.

For the design I chose the stretch between Pardubice (Dubina north stop) and Počapelské Cottages, whose distance is 2200 m. I simulate the radius of trolley, ie. the trolley will not be powered with electric power obtained from overhead lines, but will use the accumulated energy in supercapacitor, which will be supplied from the heat recovery circuit.

At the conclusion of this thesis, I made an economic evaluation of advantages of supercapacitors and Nickel-metalhydrid NiMH batteries, which I suggested as the other possible alternative solution of the accumulation of energy, or whether it would be economically preferable to cover the stretch with contact overhead line.

KEYWORDS

Supercapacitor, traction drive, recovery circuit, energy storage

Obsah

Úvod	10
1. Analýza možných způsobů akumulace energie	11
1.1 Akumulace energie pomocí elektrochemické přeměny	11
1.1.1 Olověné akumulátorové baterie	11
1.1.2 Nikl – kadmiové baterie	12
1.1.3 Nikl – metalhydridové baterie	13
1.1.4 Lithium – iontové baterie	13
1.1.5 Sodík – nikl chloridové baterie	15
1.2 Akumulace energie pomocí setrvačnicku	15
1.3 Akumulace energie pomocí elektrického pole	17
1.3.1 Princip funkce superkapacitoru	18
1.3.2 Provozně technické opatření při provozu superkapacitorů.....	20
1.4 Propojování superkapacitorů	20
1.5 Zásady při měření elektrických parametrů superkapacitorů	22
1.6 Porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie	25
2. Využití superkapacitorů v dopravní technice	26
3. Výběr vhodného trakčního pohonu	28
3.1 Základní technické parametry třínápravového nízkopodlažního trolejbusu 28 Tr Solaris.....	28
3.2 Základní technické parametry asynchronního trakčního motoru Škoda 33ML 3550 K/4	29
3.3 Popis konstrukce trakčního motoru trolejbusu 28 Tr Solaris.....	30
4. Návrh silového obvodu a rekuperačního obvodu	32
4.1 Popis rekuperačního obvodu.....	33
4.2 Pracovní režimy.....	34
4.2.1 Nabíjení superkapacitoru z trolejového vedení.....	34
4.2.2 Vybíjení superkapacitoru do stejnosměrného meziobvodu.....	37
5. Plán trasy a výpočet jízdních odporů	40
5.1 Výběr trasy – analýza traťových poměrů.....	40
5.2 Řešení jednotlivých úseků.....	42
5.3 Výpočet jízdních odporů v jednotlivých úsecích.....	43

5.4	Varianta A – uložení energie do superkapacitoru.....	49
5.5	Varianta B – uložení energie do akumulátoru NiMH.....	52
Závěr	55
Seznam literatury	56
Seznam obrázků	58
Seznam příloh	59

Úvod

Akumulace elektrické energie je jedním z doposud nedořešených technických problémů současné doby, kdy stále rostoucí nároky na její spotřebu jsou spojeny s velmi rychlým nárůstem její ceny.

V neposlední řadě je to i otázka její „ekologické“ výroby, na kterou jsou vyvozovány tlaky z hlediska produkovaných emisí. Naskytá se tedy otázka snížení její spotřeby jak na straně maloobděratelů, tak na straně velkoobděratelů. K tomu vede několik řešení jako je konstrukce nových technologií s podstatně menší energetickou náročností a v druhém případě vydanou energii při rozběhu opět s určitou účinností získat zpět. K tomu je zapotřebí energetický akumulátor.

Existují různé metody pro akumulaci energie, přes energii elektrického respektive magnetického pole nebo elektrochemickou metodou. Problematika způsobu ukládání energie elektrochemickou přeměnou spočívá v její malé objemové a hmotnostní energetické hustotě a dlouhé době chemického procesu, která brání okamžitému pojmání poměrně velkého množství energie.

Splnit požadavek vysoké energetické kapacity splňuje teprve prvek, který byl vyvinutý díky novým dostupným technologiím – superkapacitor.

V této diplomové práci využiji superkapacitor jako zdroj elektrické energie pro trolejbus 28 Tr Solaris, který představuje novou generaci pohonů s bezkomutátorovými motory.

Nejprve než přistoupím k vlastnímu úkolu řešení, pokládám za nutné provést analýzu akumulačních prvků energie.

1. Analýza možných způsobů akumulace energie

Akumulace pomocí – elektrochemické přeměny (akumulátorů)

- setrvačnicku (akumulace ve formě kinetické energie)
- elektrického pole, respektive magnetického pole

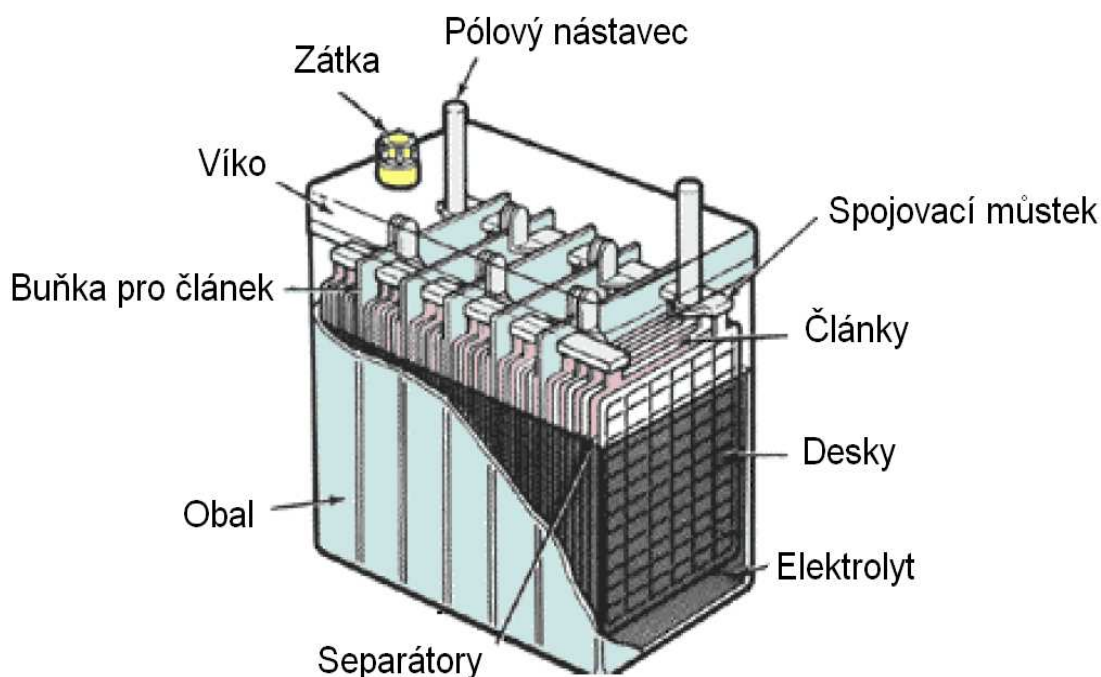
1.1 Akumulace energie pomocí elektrochemické přeměny

Nejstarším a nejběžnějším typem akumulátorů jsou elektrochemické akumulátorové baterie. Pracují na elektrochemickém principu, tudíž procházející proud vyvolá vratné chemické změny, které se projeví rozdílným elektrochemickým potenciálem na elektrodách akumulátoru. Z elektrod se následně dá čerpat na úkor těchto změn elektrická energie zpět.

Protože jsou napětí na člancích elektrochemických baterií relativně malá (cca 1,2 – 3,7V) jsou tyto články sdružovány do sériových zapojení pro dosažení vyššího napětí. Pro využití v hybridních pohonech se elektrochemické akumulátory vyznačují nízkým měrným výkonem a dlouhými nabíjecími časy způsobenými zdlouhavou elektrochemickou přeměnou. V současné době je možnost výběru z více druhů elektrochemických akumulátorových baterií. V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní charakteristiky dnes nejpoužívanějších typů elektrochemických akumulátorových baterií. [1.], [2.]

1.1.1 Olověné akumulátorové baterie (Pb-PbO₂)

Existence tohoto typu baterie se datuje od roku 1850. Díky své jednoduchosti byly tyto baterie v minulosti masově produkovány a jsou tudíž nejrozšířenějším typem baterií. Konstrukce akumulátoru je na obr. 1.1. Omezení olověného akumulátoru spočívá v tom, že v případě setrvání po delší dobu ve stavu i částečného vybití, dochází na elektrodách k prakticky nevratným změnám tzv. sulfataci, která výrazně snižuje kapacitu baterie. Nejnovějším typem jsou ventilem řízené olověné baterie (VRLA). Jedná se o zapouzdřené akumulátory se zamezením ztrát elektrolytu. Jedním z typů této baterie je typ, kde je elektrolyt zahuštěn do formy gelu, tzv. gelové olověné baterie.



Obr. 1.1. Konstrukce olověného akumulátoru

Konvenčně vyráběné olověné baterie jsou konstruovány na vysoký výkon (více než 750W/kg) a jsou často upřednostňovány z důvodu své nízké výrobní ceny, vysoké bezpečnosti a spolehlivosti. Nevýhodami těchto baterií je nízká měrná energie (30 až 40 Wh/kg), malý výkon za nízkých teplot a malá životnost. Účinnost ukládání energie se pohybuje nad 80%. [4.]

Proti využití tohoto typu baterie v hybridních vozidlech hovoří fakt, při dobíjení jakéhokoliv množství energie, proběhne jeden dobíjecí cyklus baterie. Takovýchto cyklů vykoná hybridní vozidlo za den velmi mnoho, tudíž životnost olověné akumulátorové baterie by se počítala v řádu jednotek týdnů. [2.]

1.1.2 Nikl – kadmiové baterie (NiCd)

Nikl – kadmiové baterie jsou používány v mnoha elektronických zařízeních, přestože byly vyvíjeny pro automobilové použití. Mají vyšší měrný výkon (40 až 60 Wh/kg) a delší životnost než-li olověné akumulátory. Jejich nevýhodou je pořizovací cena, na které se také podílí cena následného recyklování kadmia, které

je velmi toxické. Nepříjemným aspektem je také vysoká hodnota samovybíjení, která však například v aplikaci u hybridního pohonu není hlavním výběrovým kritériem.

Dalším problémem nikel-kadmiových baterií je jejich paměťový efekt. Ten se vyznačuje tím, že pokud se dobíjí zcela nevybitá baterie, tak se energetická kapacita baterie snižuje. Je tedy zapotřebí příležitostně tuto baterii zcela vybit. [1.], [2.]

1.1.3 Nikl – metalhydridové baterie (NiMH)

Baterie NiMH jsou běžně používané ve spotřební elektronice a patří na počátku 21. století k jednomu z nejčastěji používaných typů elektrochemických akumulátorových baterií. Některé jsou také s úspěchem používány v elektromobilech a také v hybridních automobilech např. společnosti Honda nebo Toyota. Měrný výkon je obdobný jako u nikel-kadmiových baterií, avšak měrná energie je vyšší cca (60 až 80 Wh/kg). Rychlost nabíjení malých baterií v domácích spotřebičích je nižší než-li u NiCd baterií, avšak u trakčních baterií určených pro hybridní vozidla bylo dosaženo akceptovatelných hodnot. Další negativní vlastností je zvýšená teplotní citlivost, která v praxi při aplikaci v trakční problematice implikuje potřebu kontinuální teplotní diagnostiky. [2.], [4.]

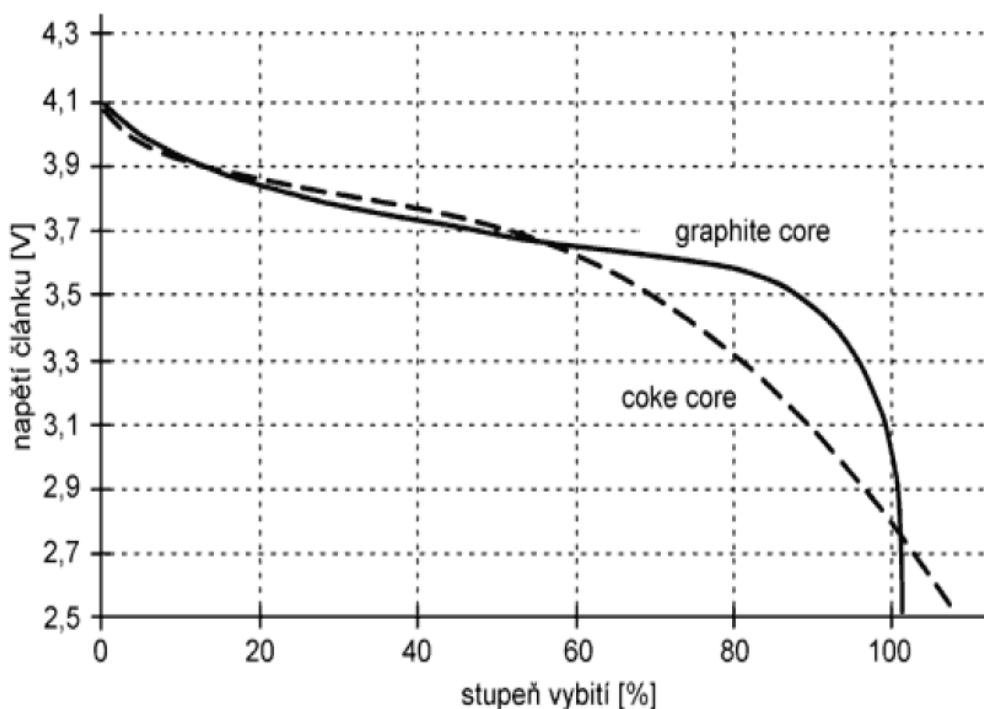
Při porovnání s NiCd bateriemi jsou baterie NiMH výrazně náchylné k paměťovému efektu, ale stále nedosahují v této oblasti vlastností olověných baterií. Výraznou nevýhodou je vysoké procento samovybíjení, které dosahuje hodnoty cca 30% za během jednoho měsíce. Recyklovatelnost NiMH baterií je z důvodu absence kadmia o mnoho lepší než u NiCd baterií.

Hlavním problémem NiMH baterií je jejich vysoká cena, srovnatelná s NiCd bateriemi, která je dána cenou vstupních komponentů, resp. především niklu. [2.]

1.1.4 Lithium – iontové baterie (Li-ion)

V praxi se dnes dá setkat se dvěma typy Li-ion akumulátorů, které se liší provedením záporné elektrody (u akumulátorů je to anoda). V obou případech je to uhlík, v prvním jako „koks“, v druhém ve formě grafitu. Akumulátory s „coke“ anodou používají mikrokystalickou formu uhlíku, která se dříve označovala také jako „amorfní uhlík“. Je shodná s grafitem, ale na rozdíl od něj má jen nepatrné a neorientované krystaly. Tyto akumulátory se liší tvarem vybíjecí křivky, nabíjecím

napětím a napětím, při kterém je třeba ukončit vybíjení. Typická vybíjecí křivka je na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Typická vybíjecí křivka akumulátoru Li-ion [3.]

Pro úplnost je třeba uvést, že se vyrábějí i akumulátory s grafitovou anodou, které mají díky upravené technologii výrobu nabíjecí napětí 4,2 V a vybíjecí 2,5 V. V tab.1.1 jsou uvedeny hodnoty nabíjecího a vybíjecího napětí u akumulátoru Li-ion.

Typ Li-ion akumulátoru	Max. nabíjecí napětí [V]	Konečné vybíjecí napětí [V]
coke	4,2	2,5
graphite	4,1	3,0

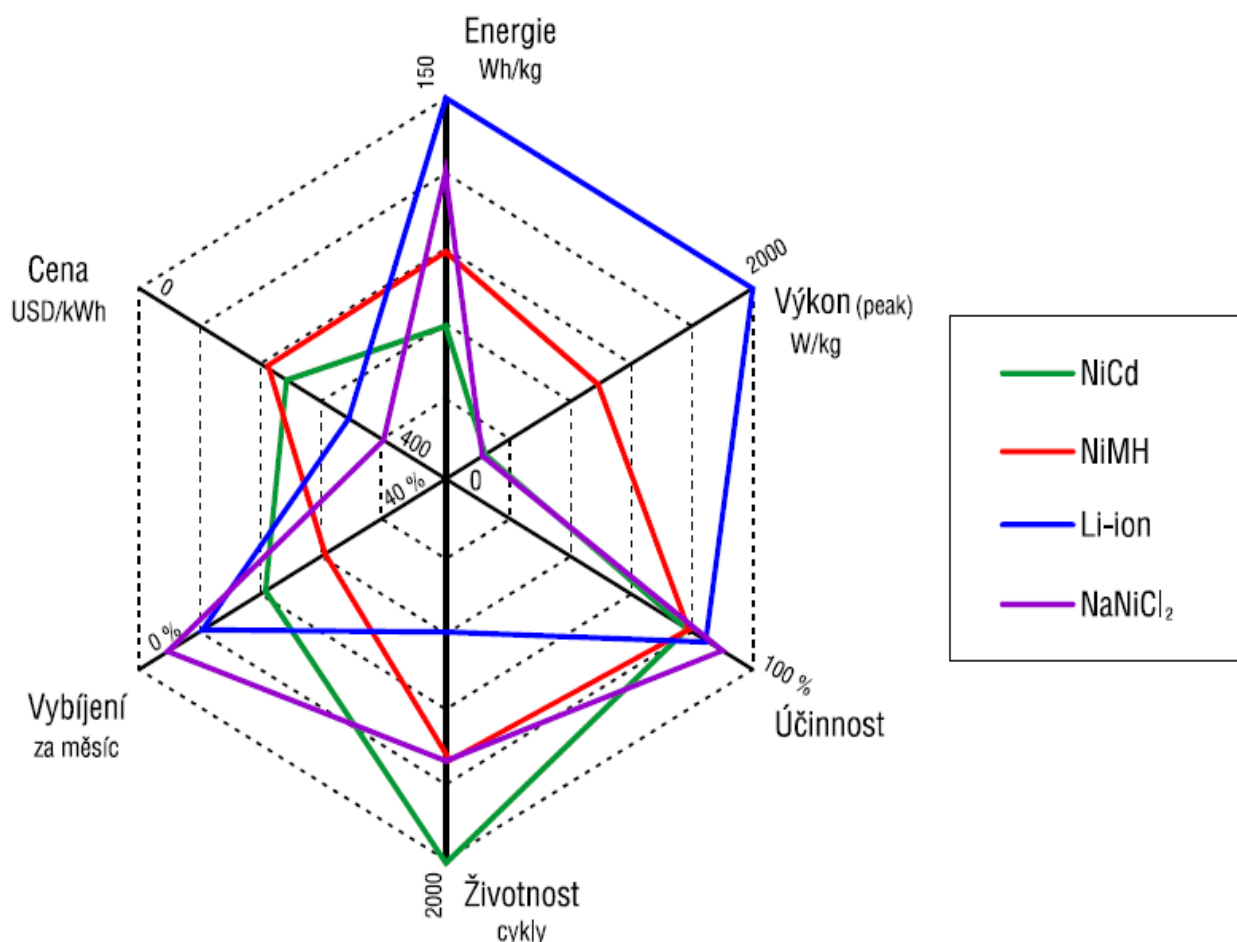
Tab. 1.1 Hodnoty nabíjecího a vybíjecího napětí Li-ion akumulátoru [3.]

Akumulátory Li-ion jsou velmi kvalitním zdrojem energie, jsou malé, lehké a výkonné. Mají malé samovybití a jednoduše se nabíjejí. Je však třeba s nimi zacházet šetrněji než s akumulátory NiCd nebo NiMH. Hodí se pro přístroje s malým a středním odběrem. [3.]

1.1.5 Sodík – nikel chloridové baterie (NaNiCl₂)

Tento typ baterií se řadí mezi vysokoteplotní baterie, tedy baterie využívající roztavenou sůl jako elektrolyt. Tento směr vývoje se zdá být velmi perspektivním ve vývoji baterií. Teplota tuhnutí elektrolytu je 157 °C a pracovní teplota elektrolytu se pohybuje v rozmezí 270 až 350 °C, což značně zmenšuje konstrukci článku. [6.]

Tyto baterie stejně jako baterie Li-ion vyznačují vysokým měrným výkonem a energií (90 až 120 Wh/kg). Nevýhodou tohoto typu je vysoká teplota elektrolytu, což snižuje bezpečnost při havárii baterie a také velmi nízká pohltivost energie při nabíjení. Přesto jde o baterie s vlastnostmi velice vhodnými pro trakční účely ve vozidlech. Jejich výrobní cena je prozatím vysoká. [1.], [2.]



Obr. 1.3 Porovnání vlastností nejpoužívanějších typů akumulátorů [2.]

1.2 Akumulace energie pomocí setrvačníku

Setrvačník je elektromechanický systém akumulování energie založený na principu kinetické energie rotujících hmot. Konstrukčně se tělo setrvačníku skládá

z hřídele, na níž je integrován rotor setrvačnicku a elektrický stroj. Společně tedy rotor setrvačnicku s elektrickým strojem vytváří rotující hmotu, díky níž můžeme ukládat energii, která se převádí z elektrické na kinetickou a naopak.

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (1 - 1)$$

E_K – kinetická energie [J]

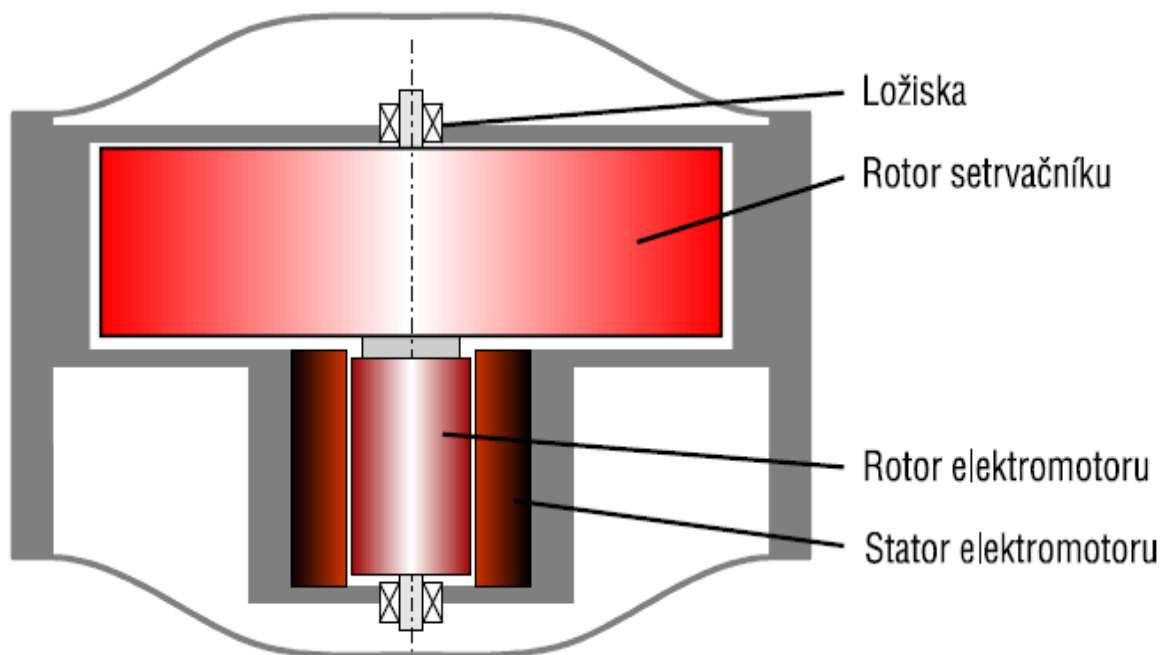
J – moment setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

ω – uhlová rychlost [s^{-1}]

$$J = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot m \quad (1 - 2)$$

r – poloměr tělesa setrvačnicku [m]

m – hmotnost setrvačnicku [kg]



Obr.1.4 Schéma setrvačnicku [2.]

Když je elektrická energie transformována na kinetickou, pracuje elektrický stroj jako elektromotor, toto nastává v případě akumulace brzděné energie. Pokud rekuperovaná energie již nestačí na další urychlení setrvačnicku, je elektromotor odpojen z obvodu. V případě potřeby akumulované energie je kinetická energie opět

transformována na elektrickou, tzn. Že elektrický stroj pracuje jako generátor.

Vstupní a výstupní výkon je limitován typem použitého motoru / generátoru a také použitou výkonovou elektronikou. Díky jejímu nedávnému vývoji na poli IGBT a FET tranzistorů mohou být setrvačníky použity pro akumulaci energie v pohonech s velkými výkony a výkonovými špičkami v rozsahu od kilowattů po stovky megawatt.

Rotující setrvačník však postupně ztrácí svou nabytou energii díky působení odporů v ložiskách, aerodynamickému odporu aj. Proto se např. odčerpává atmosféra uvnitř setrvačníku nebo se nahrazuje inertním plynem. Dále se mohou u stacionárních setrvačnicků pro další snížení odporů použít elektromagnetická ložiska, která u dopravních prostředků nepřicházejí v úvahu, proto je u nich užíváno valivých ložisek.

Z rovnice (1 - 1) vyplývá, že množství akumulované energie závisí kvadraticky na úhlové rychlosti rotoru setrvačníku. Dále z rovnice (1 - 2) vylívá taktéž kvadratická závislost momentu setrvačnosti na poloměru rotoru. Tedy hlavním parametrem setrvačníku je rychlost rotace rotoru a také poloměr rotoru. Hmotnost rotujících částí je tedy méně významná. Samozřejmě že rovnice (1 - 2) platí pro zjednodušený případ válcového rotoru setrvačníku, ale pro základní rozvahu je postačující.

Z předchozího vyplývá, že je důraz kladen na úhlovou rychlost a rozložení hmot. Proto je u nejmodernějších setrvačnicků rotor vyroben z karbonového kompozitu. Výhodou tohoto materiálu oproti oceli je lepší odolnost proti vzniku trhlin, která dovoluje použití vyšší úhlové rychlosti, odpovídající obvodové rychlosti cca 1,2 km/s. Nevýhodami karbonového kompozitu oproti oceli jsou relativně malá hustota a poměrně složitá výroba.

Nepříznivým jevem pro zabudování setrvačníku do vozidla je gyroskopický efekt bránící natáčení osy rotace setrvačníku. Z tohoto důvodu se setrvačníky dosazují do vozidel v poloze s vertikální osou rotace. [1.], [2.]

1.3 Akumulace energie pomocí elektrického pole

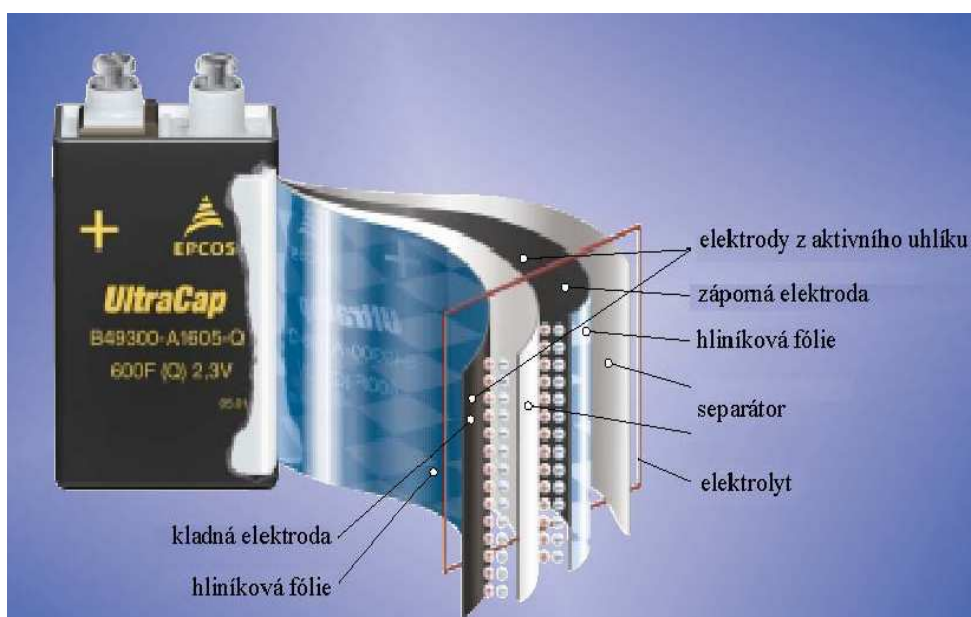
Kondenzátor je jediná součástka, ve které lze akumulovat energii přímo v elektrické formě. U všech ostatních typů akumulátorů je energie uchovávána v mechanické, chemické nebo magnetické formě. Pro akumulaci elektrické energie je tedy kondenzátor principiálně nejvýhodnější, jelikož není nutné energii před akumulací transformovat do jiné formy.

Běžný elektrolytický kondenzátor není pro akumulaci el. energie vhodný, vzhledem ke své nízké měrné energii (0,01 Wh/kg). V poslední době se však začíná hovořit o superkapacitoru, jehož měrná energie je až 100 x vyšší. [1.]

1.3.1 Princip funkce superkapacitoru

Princip uchování energie v superkapacitoru vychází z efektu, který popsal již v roce 1856 K. Hemholtz. Jedná se o vytvoření elektrochemické dvouvrstvy po přiložení napětí na elektrody ponořené ve vodivé tekutině. Proto je superkapacitor někdy také nazýván elektrochemickým dvouvrstvým kondenzátorem. Stejně jako u běžného kondenzátoru je zde energie uchovávána v elektrostatickém poli.

V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvouvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí, při které jsou náboje z elektrod schopny přejít k iontům v elektrolytu. Při vyšším než disociačním napětí dochází k chemickým reakcím, které vedou k vývinu vzduchu a následnému zničení kondenzátoru. U elektrolytů na bázi vody je tato napěťová hranice 1,2 V, zatímco u elektrolytů na bázi organických rozpouštědel se tato napěťová hranice pohybuje v rozmezí 2 až 3 V.



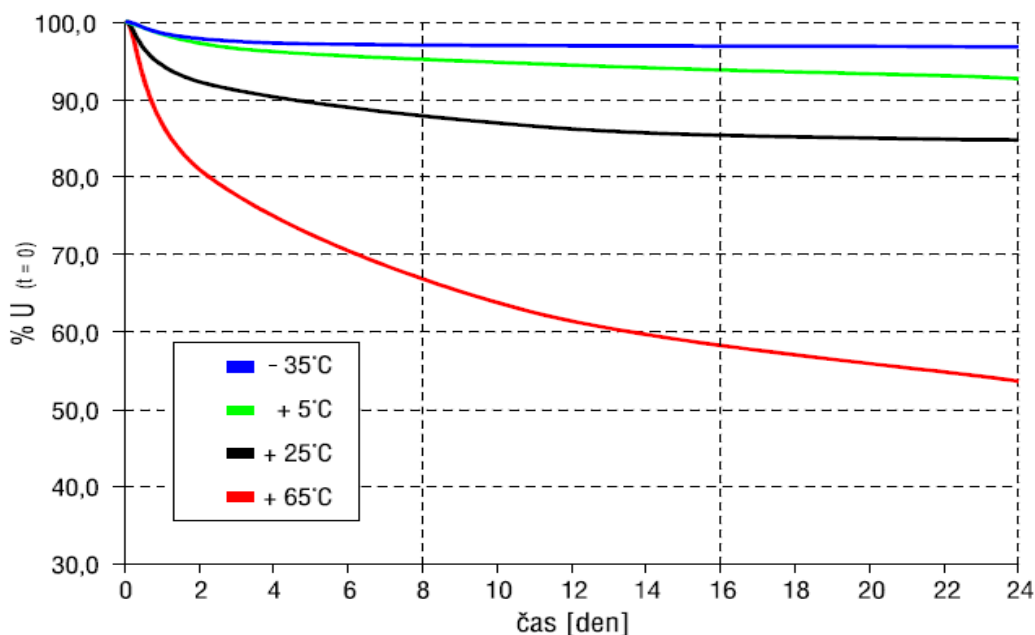
Obr.1.5 Řez superkapacitorovým článkem [7.]

Materiálem vhodným pro elektrody superkapacitoru se ukázal být aktivní uhlík. Důvodem je velká dosažitelná plocha skutečného povrchu (vysoká poréznost), chemická netečnost, elektrická vodivost a relativně nízká cena. Lze dosáhnout povrchu elektrod až 2000 m²/g, což při extrémně malé tloušťce dvouvrstvy (do 10 nm) znamená kapacitu řádově tisíců Farad ve velmi malém objemu. Na obr. 1.5 je znázorněn řez supekacitoru s parametry 600 F / 2,3 V s rozměry 4 x 6 x 9 cm a váží pouze 290 g. [7.]

Elektrody superkapacitoru jsou vytvořeny paralelním propojením porézních uhlíkových „plátů“, ponořených ve vysoce vodivém organickém elektrolytu. Elektrické připojení je realizováno spojením uhlíkového plátu s hliníkovou fólií. Jednotlivé elektrody jsou navzájem odděleny tenkými separátory z papíru, polymerů nebo skleněných vláken.

Na rozdíl od baterie, ve které je energie uchovávána přeměnou chemických vazeb, spočívá činnost dvouvrstvého kondenzátoru v prostém posuvu iontů v elektrickém poli. Jelikož u elektrod nedochází při nabíjení a vybíjení k žádné látkové přeměně, tím dosahuje superkapacitor velmi vysoké životnosti a vysokého počtu cyklů nabíjení.

Elektrické vlastnosti superkapacitorů jsou zachovány při nízkých teplotách do - 40°C a maximální provozní teplotě do 105°C. Na obr.1.6 je znázorněn průběh úbytku napětí superkapacitoru v závislosti na teplotě. [2.]



Obr.1.6 Průběh úbytku napětí superkapacitoru v závislosti na teplotě [1.], [2.]

1.3.2 Provozně technická opatření při provozu superkapacitorů

V praxi je nutné dodržovat při provozu a údržbě určité zásady vyplývající z jejich vlastností. Jelikož v mém případě budu volit jako zásobník energie superkapacitor, uvádím další poznatky k jejich provozu. Problém nastává zejména při jejich spojování zejména v seriovém řazení do kondenzátorových baterií, které je nutné z hlediska velmi nízkého napětí jednoho elementu (cca 2,5V). Na superkapacitorech zapojených do série se napětí rozdělí podle velikosti kapacity jednotlivých článků. Po delší době je napětí na jednotlivých člancích ovlivněno zbytkovým proudem každého z článků. Předpokládejme např. baterii 20-ti superkapacitorů nabitou na 50 V. Pokud články mají shodnou kapacitu, bude každý článek nabitý na 2,5 V. Jestliže mají články různou kapacitu, články s vyšší kapacitou budou nabity na nižší napětí a články s nižší kapacitou na vyšší napětí. Průměrné napětí na člancích bude 2,5 V.

Každý z článků se samovolně vybíjí přes vnitřní „paralelní odpor“ zbytkovým proudem. Po určitém čase články s vyšším zbytkovým proudem budou mít nižší napětí a naopak. Celkové napětí se přerozdělí na ostatní články a v důsledku toho může napětí na člancích s nižším zbytkovým proudem přesáhnout dovolené pracovní napětí.

K vyrovnání napětí na jednotlivých člancích je možné připojit paralelně ke každému článku rezistor, kterým musí protékat proud několikrát vyšší než je zbytkový proud článku.

Paralelní zapojení rezistorů k sériově spojeným superkapacitorům je metodou pasivní. Pro použití baterie superkapacitorů v režimu cyklů s krátkou periodou je doporučena aktivní metoda, při které jsou k baterii připojeny spínače s proměnným odporem, jehož velikost je řízena skutečným napětím na člancích. [9.]

V příloze č.1a a 1b, je schéma a popis součástí napěťového balancéru od firmy Maxwell.

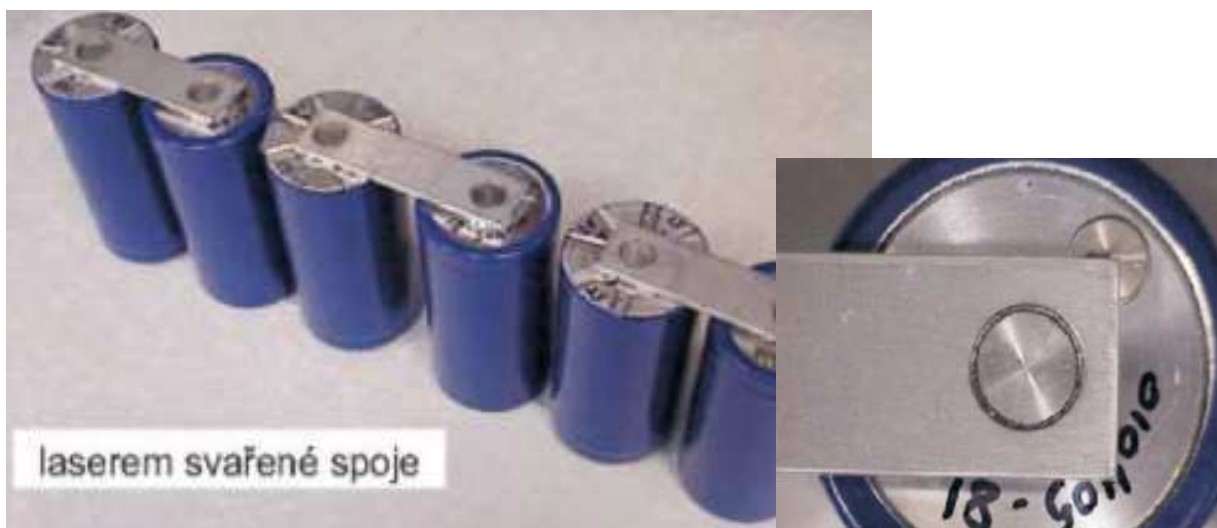
1.4 Propojování superkapacitorů

Propojování superkapacitorů má obdobné zásady, jako propojování všech zdrojů velkých proudů, např. akumulátorů. Je tedy nutné dbát na malý elektrický odpor všech vodivých spojení a mechanickou pevnost spojů odolávající mechanickým otřesům a tepelné roztažnosti.

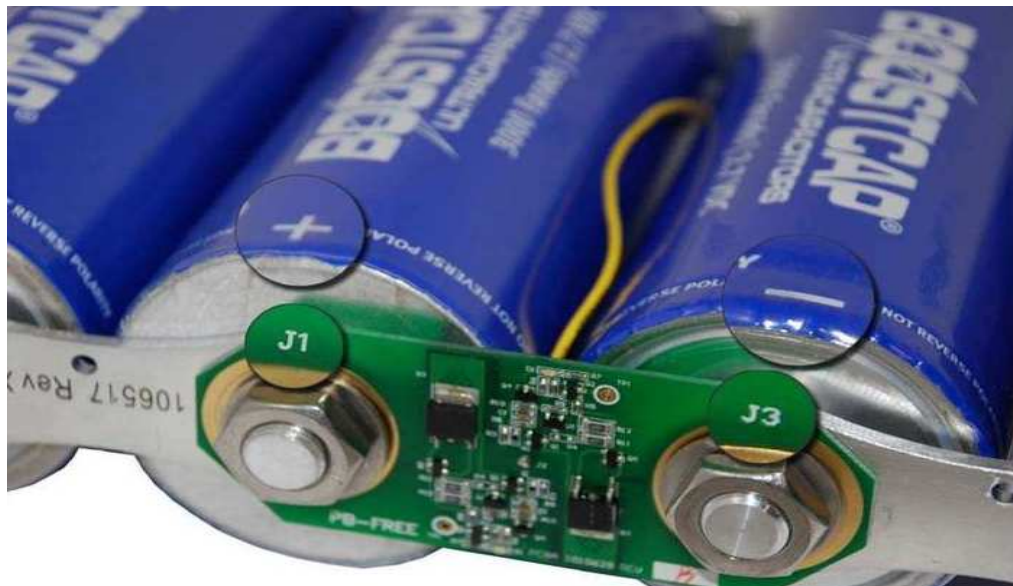
Zásady pro propojování superkapacitorů:

- a) *Odpor spojů* – při průchodu velkých proudů se spoje zahřívají. Povrch spojovaných dílů musí být čistý, šroubové spoje utaženy předepsaným momentem. Spoje by měly mít tak velkou kontaktní plochu jak jen je možné.
- b) *Ošetření povrchu spojů* – elektrický odpor spojů se zvyšuje oxidací. Doporučuje se očistit oxidovaný povrch spojů a nanést elektricky vodivou impregnační pastu.
- c) *Tepelná roztažnost* – při spojení materiálu s různou teplotou roztažností může docházet k uvolňování spojů, zvyšování hodnoty elektrického odporu, většímu ohřívání a tím zhoršování parametrů superkapacitorů a snižování doby života. Doporučuje se navrhnout mechanické řešení elektrických spojů s ohledem na maximální očekávané tepelné dilatace (např. pružné podložky).
- d) *Plocha propojovacích vodičů* – plocha (průřez) propojovacích vodičů musí být navržena na nejvyšší očekávané proudy
- e) *Elektrická izolace* – fólie, kterou je opatřen povrch superkapacitorů, nemusí být dostatečnou elektrickou izolací při montáži do bloků a musí být navržena přídatná izolace mezi jednotlivými superkapacitory a nebo mezi blokem a montážní konstrukcí. Materiál a tloušťka izolace musí být navržena s ohledem na pracovní napětí bloku superkapacitorů.
- f) *Galvanická koroze spojů* – při spojení různých materiálů dochází ke galvanické korozi vlivem různých elektrochemických potenciálů obou materiálů. Doporučuje se pro spojování superkapacitorů volit materiál s co nejmenší galvanickou aktivitou vůči hliníku.
- g) *Mechanické namáhání elektrických spojů a jednotlivých superkapacitorů* – mechanické spoje i celá konstrukce bloku musí odolávat očekávanému namáhání od nárazů a chvění, aby se zabránilo poškození izolace nebo jiných částí bloku. *Ochrana před nadměrným přehříváním* – v mnoha aplikacích jsou superkapacitory vystaveny zvýšeným teplotám. Vhodně navržené elektrické spoje mohou účinně teplo ze superkapacitorů odvádět. Mohou být navrženy také přídatné chladiče, chlazení proudícím vzduchem apod.
- h) *Dodržování bezpečnosti*. Jako při všech elektrických měřeních je třeba dodržovat bezpečnost úměrnou hodnotám používaných napětí. Všechny

elektrické vodiče musí být dimenzovány na očekávané hodnoty proudu a izolovány na používaná napětí. Při dlouhodobých testech by měl být superkapacitor ochlazován, aby jeho teplota nepřesáhla dovolenou pracovní teplotu [9].



Obr.č. 1.7 Sériové řazení superkapacitorů pomocí laserového svaření



Obr. 1.8 Detail propojení superkapacitorů [16.]

1.5 Zásady při měření elektrických parametrů superkapacitorů

Firma Maxwell testuje superkapacity v režimu nabíjení a vybíjení konstantním proudem. Tento test může být užitečný pro ověření parametrů superkapacitoru před použitím v reálné aplikaci. Všechny superkapacity jsou kvůli bezpečnosti skladovány vybité. Po každém testu se doporučuje úplné vybití

a zkratování vývodů každého superkapacitoru, který nebude zapojen ve funkčním zařízení.

Seznam přístrojů pro testování superkapacitoru vybíjením konstantním proudem:

- obousměrný výkonový zdroj (zdroj / zátěž) nebo - oddělený napájecí zdroj a zátěž nastavitelná na konstantní proud
- měření a registrace napětí v závislosti na čase (např. digitální osciloskop)
- měření a registrace proudu v závislosti na čase (není nutné pokud je nastavení proudu ve zdroji i zátěži spolehlivé). Rychlost zápisu měřeného napětí a proudu je vhodné nastavit na co nejvyšší rychlost, přesnost výpočtu se tím zvýší
- **Nastavení** – nastavíme napětí a proud zdroje na požadované hodnoty a zdroj vypneme. Proud může být nastaven na jakoukoliv hodnotu nižší než maximální dovolený proud superkapacitoru. Maxwell obvykle nastavuje proud na 20% a 50% maximální hodnoty. Pokud je měření prováděno opakovaně s vysokými hodnotami proudu měl by být superkapacitor ochlazován proudícím vzduchem. Napětí zdroje nesmí být vyšší než maximální dovolené napětí superkapacitoru. Jednotlivý superkapacitor má maximální napětí 2,5 V (např. BCAP350) nebo 2,7 V (např. MC2600). Šest sériově zapojených superkapacitorů může být nabíjeno na jakékoliv napětí, až do šestinásobku napětí jednotlivých superkapacitorů **Nabíjení** – pokud je zdroj nastaven a superkapacitor připojen, můžeme zapnout napájecí zdroj. Nabíjíme superkapacitor nastaveným proudem na nastavenou hodnotu napětí.
- **Vybíjení** – pokud je používán oddělený napájecí zdroj a zátěž místo obousměrného zdroje (zdroj + zátěž), odpojíme napájecí zdroj před vybíjením superkapacitoru. Nestačí pouhé vypnutí zdroje. Některé napájecí zdroje mohou zatěžovat superkapacitor i ve vypnutém stavu. Připojíme k superkapacitoru zátěž s nastaveným konstantním proudem. Vybijeme superkapacitor na napětí 0.1V nebo na hodnotu, při které zátěž ještě zaručuje konstantní proud. Ihned po dosažení minimálního napětí na superkapacitoru odpojíme zátěž, aby napětí na superkapacitoru se mohlo vrátit na hodnotu měřenou v nezátíženém stavu. Vybíjení superkapacitoru může být zastaveno na jakémkoliv napětí. Maxwell testuje některé superkapacity vybíjením na napětí 0.1V a jiné na napětí rovné polovině počátečního napětí. Vypočtená hodnota kapacity je o něco vyšší při vybíjení na poloviční napětí. [9.]

– Výpočet kapacity $C = \frac{I_d \cdot t_d}{U_0 - U_f}$ [F, A, s, V] (2-1)

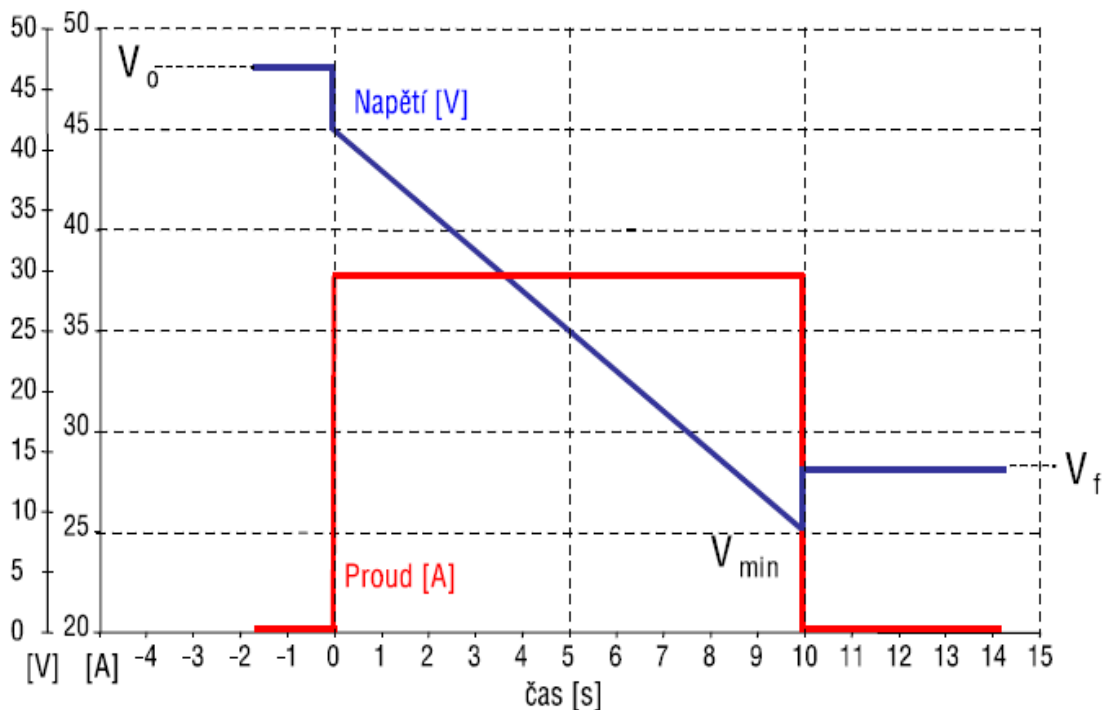
- U_0 - počáteční napětí na superkapacitoru [V]
- U_{\min} - minimální napětí na superkapacitoru s připojenou zátěží [V]
- U_f - napětí na superkapacitoru 5 sekund po odpojení zátěže [V]
- I_d - vybíjecí proud [A]
- t_d - čas vybití superkapacitoru z napětí U_0 na napětí U_f [s]

- Ekvivalentní stejnosměrný sériový odpor

$$R_{\text{esr}} = \frac{U_f - U_{\min}}{I_d} \text{ [}\Omega\text{, V, A]} \quad (2-2)$$

– Uložená energie $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2$ [J, F, V] (2-3)

– Dodaná energie $\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_0^2 - U_f^2)$ [J, F, V] (2-4)

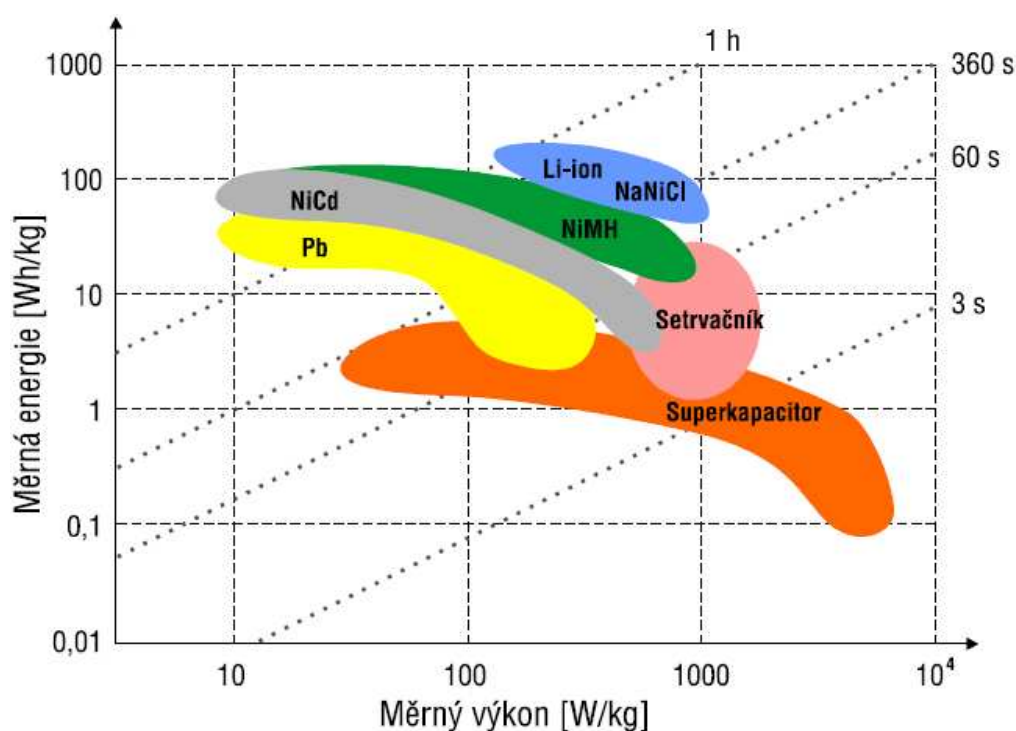


Obr. 1.9 Průběh napětí a proudu při vybíjení [9.]

- **Dodržování bezpečnosti.** Jako při všech elektrických měřeních je třeba dodržovat bezpečnost úměrnou hodnotám používaných napětí. Všechny elektrické vodiče musí být dimenzovány na očekávané hodnoty proudu a izolovány na používaná napětí. Při dlouhodobých testech by měl být superkapacitor ochlazován, aby jeho teplota nepřesáhla dovolenou pracovní teplotu [9].

1.6 Porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie

Při vzájemném porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie použitelných ve vozidle s elektrickým přenosem výkonu lze říci, že nejvyužívanější elektrochemické akumulátorové baterie se sice vyznačují (podle typu) vysokou měrnou energií, ale jejich měrný výkon je podstatně nižší v porovnání se setrvačником nebo superkapacitorem viz. obr. 1.10.



Obr.1.10 Porovnání různých zdrojů el. energie s ohledem na měrnou energii a výkon [2]

2. Využití superkapacitorů v dopravní technice

Moderní vozidla elektrické trakce dokáží kinetickou energii při brzdění přeměnit zpět na energii elektrickou a vracet ji v dostatečné kvalitě zpět do trakční sítě. Proces rekuperace energie zpět do trakční sítě má však u vozidel stejnosměrného systému jednu důležitou podmínku a sice, že bude rekuperovaná energie ihned spotřebovávána v jiném vozidle nebo u střídavé trakce navrácena zpět do rozvodné energetické sítě.

Tato podmínka je často obtížně splnitelná a kinetická energie se musí mařit v brzdových odporcích či mechanických brzdách. Zde se právě nabízí akumulace rekuperované energie v okamžiku, kdy nemůže být spotřebována a k tomuto účelu je právě velmi vhodný superkapacitor.

V trolejbusové dopravě se nabízí dvě alternativy:

- *Závislé vozidlo* s pevnými napájecími body na zastávkách, kde vozidlo s elektrickým pohonem naakumuluje potřebnou energii do superkapacitoru (spojení na energetický zdroj buď inдукtivní cestou nebo kontaktním spojením) a prostřednictvím regulační výkonové elektroniky odčerpává energii z kondenzátoru.
- *Polozávislé vozidlo* – jednalo by se o obsluhu koncových nezatrolejovaných úseků, kde z troleje si během jízdy vozidlo naakumuluje potřebnou energii na požadovaný akční rádius.

Další uplatnění nachází tento moderní akumulační prvek v oblasti osobních i nákladních silničních vozidel, kde mohutný rozvoj automobilní techniky používající k pohonu spalovacích motorů, přináší vážné problémy s exhalacemi zejména ve velkých městských aglomeracích.

Vývoj v této oblasti se proto začal ubírat směrem k hybridním pohonům. Ve srovnání se spalovacími motory, kde energetický obsah je uložen v palivu, je pro akumulátory negativem jejich velká objemová a nízká hmotnostní energetická hustota. Zde jasně doposud konkuruje spalovací motor, který pracuje u hybridního pohonu s optimalizovaným pracovním režimem. Ve fázi jízdy s nevyužitým výkonem,

se ukládá energie do energetického zásobníku, kam se ukládá i rekuperovaná energie při brzdění.

Akumulovaná energie je zde pak využívána jen pro krytí zvýšených výkonových nároků při jízdách manévrech, jako je například rozjezd, předjíždění apod. I zde jsou kladeny vysoké nároky na akumulční prvek z hlediska dynamiky příjmu a výdeje energie a klasický akumulátor se jeví jako nedostatečně účinný, vlivem pomalé chemické přeměny elektrické energie na chemickou a obráceně. A zde nachází další možnost využití superkapacitorů. [8.]

3. Výběr vhodného trakčního pohonu

S ohledem na výhledovou koncepci v nasazování nové generace trolejbusů jsem si zvolil variantu trolejbusu s nízkopodlažním provedením u Škoda 28 Tr Solaris, který jezdí ve městě Pardubice.

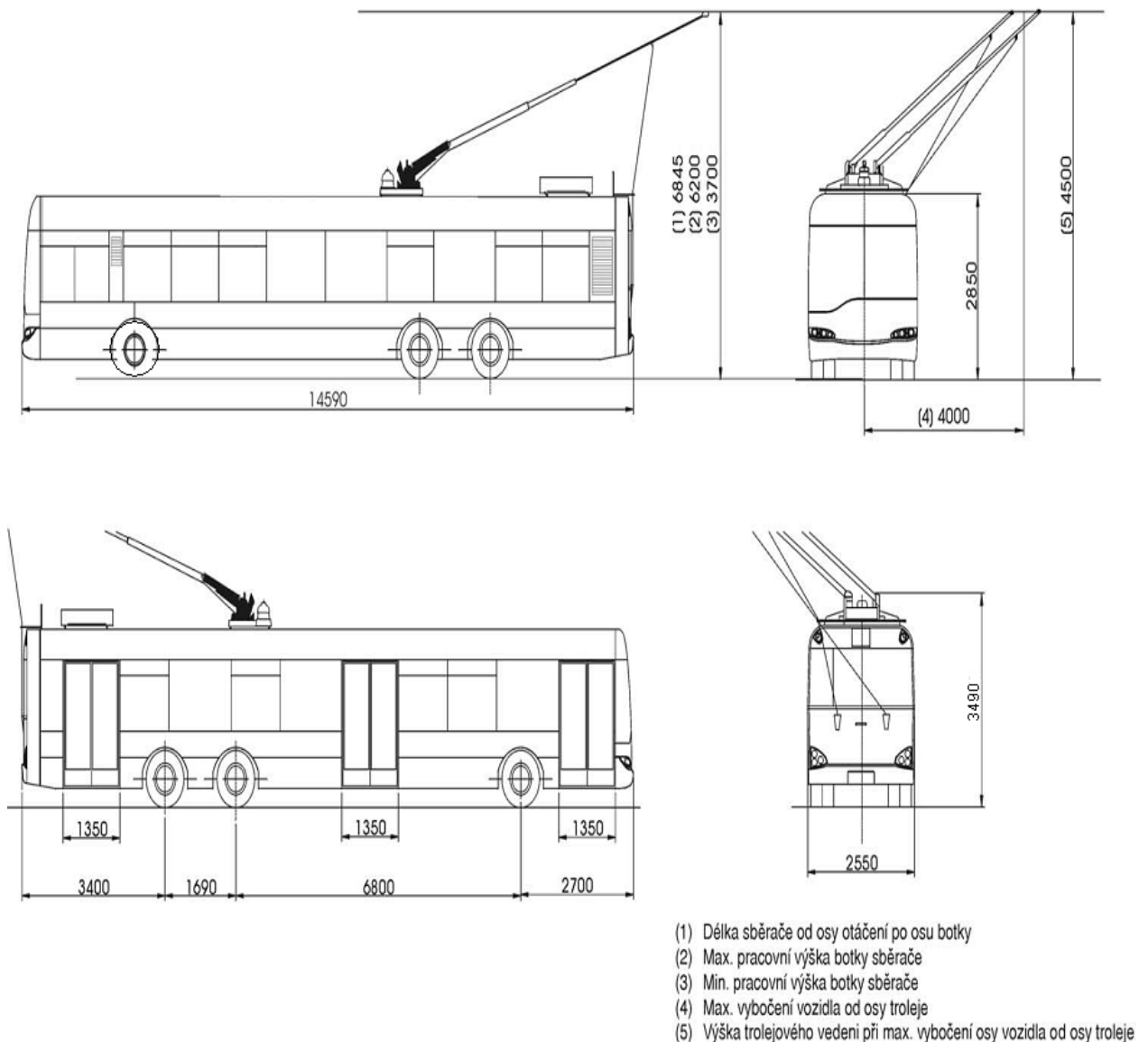
Prototyp třínápravového trolejbusu Škoda 28 Tr Solaris byl postaven na podzim roku 2007 v Plzni a od konce října roku 2008 procházel v Pardubicích zkušebním provozem. V prosinci roku 2008 bylo městem Pardubice zakoupeny čtyři tyto trolejbusy za téměř 45 mil Kč. V současné době město Pardubice vlastní 8 kusů těchto trolejbusů, z nichž 1 kus je zapůjčen (27.4. 2010) ve Zlíně ke zkušebnímu provozu.

Tyto trolejbusy mají kapacitu 43 míst k sezení a 112 k stání, což je o 1/3 více než jiné typy trolejbusů. Díky říditelné zadní nápravě mají lepší jízdní vlastnosti při průjezdech křižovatkami a oblouky. Pro řidiče je jízda s těmito vozy trochu komplikovanější v tom smyslu, že je třeba více sledovat provoz kolem vozidla, jelikož při jeho délce vozidlo vybočuje o více než metr při jízdách v obloucích.

Důvod proč jsem zvolil tento typ trakčního pohonu je ten, že matematický model výpočtu akčního rádiusu trolejbusu budu aplikovat na úseku Pardubice Dubina sever – Počelapské Chalupy, jejíž vzdálenost činí 2 200 m.

3.1 Základní technické parametry třínápravového nízkopodlažního trolejbusu 28 Tr Solaris

➤ Délka vozu	14.590 mm
➤ Výška vozu	3.490 mm
➤ Šířka vozu	2.550 mm
➤ Pohotovostní hmotnost	14.000 kg
➤ Maximální rychlost	65 km
➤ Asynchronní trakční motor	Škoda 33ML 3550 K/4
➤ Jmenovitý výkon 3f.asynchronního trakčního motoru	240 kW
➤ Jmenovitý výkon střídače pro hlavní pohon	225 kVA
➤ Jmenovitý výkon měniče pro pomocné pohony	10 kVA
➤ jmenovitý proud nabíječe vozové baterie	220 A



Obr.3.1 Typový výkres trolejbusu Škoda 28Tr Solaris [12.]

3.2 Základní technické parametry asynchronního trakčního motoru

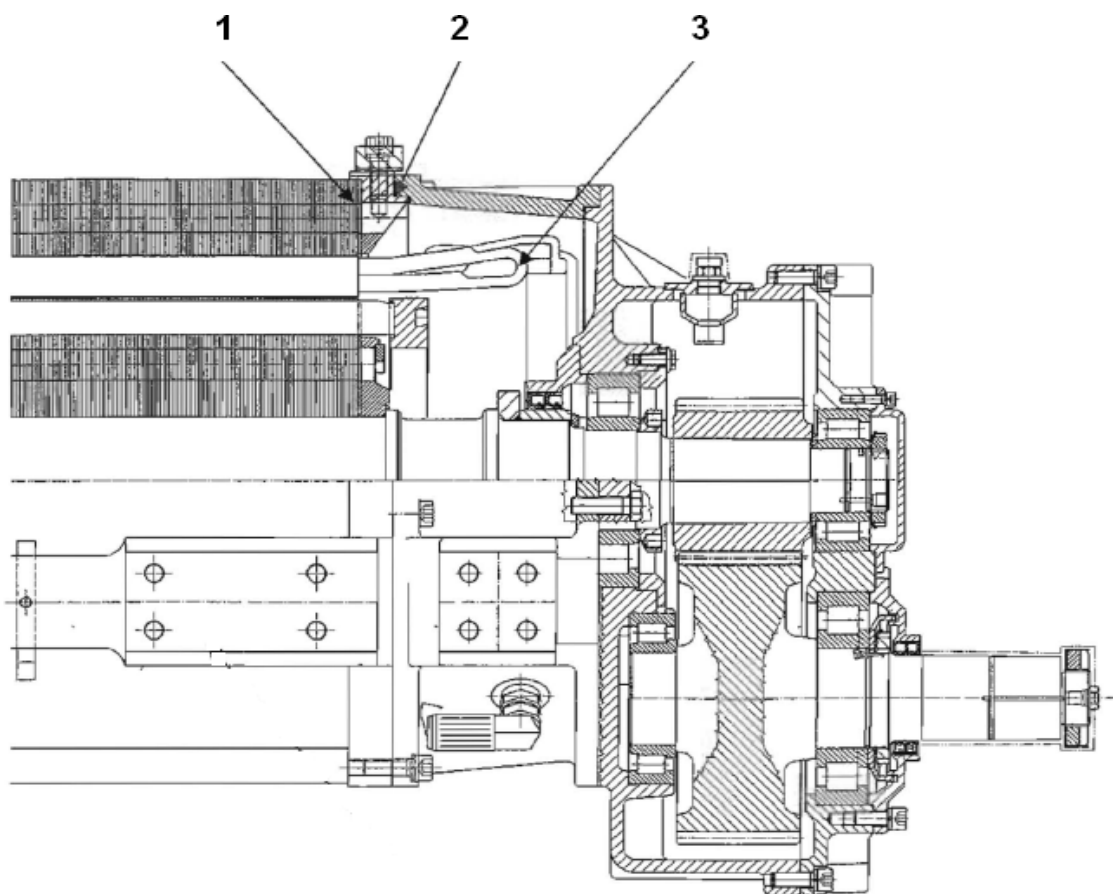
Škoda 33ML 3550 K/4

➤ Jmenovité napětí	400 V
➤ Jmenovitý výkon	240 kW
➤ Jmenovitá frekvence	50 Hz
➤ Jmenovitý proud fázový	407 A
➤ Jmenovité otáčky	796 ot./min
➤ Maximální otáčky	2270 ot./min
➤ Hmotnost motoru	710 kg ± 5%
➤ Převod	1:1,85

3.3 Popis konstrukce trakčního motoru trolejbusu 28 Tr Solaris

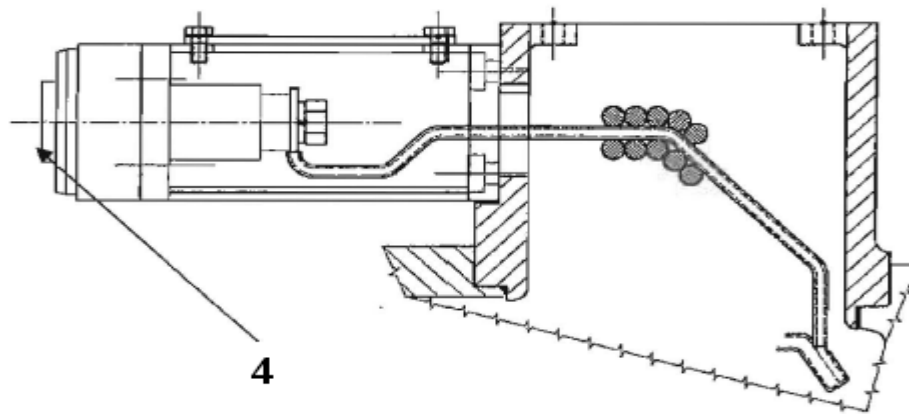
Motor má svařovanou kostru. Ta se skládá z paketu statorových plechů tloušťky 0,5 mm. Celý paket je slisován mezi krajními plechy (1) obr.3.2 a masivními stahovacími deskami (2), které zároveň tvoří příruby ložiskových štítů. Paketem procházejí po obvodě rovnoměrně rozložené větrací kanály pro průchod chladícího vzduchu. Je stažen čtyřmi trámcí, přivařenými ke stahovacím deskám.

Plechý statoru mají po obvodě drážky, do kterých je založeno vinutí statoru(3).



Obr. 3.2 Řez asynchronního motoru [12.]

Toto vinutí je třífázové, čtyřpólové, dvouvrstvé se stejnými cívkami a dvěma paralelními větvemi. Začátky fází jsou vyvedeny do konektoru (4) viz. obr. 3.3. Konce jsou propojeny v motoru do hvězdy. V čele vinutí statoru jsou na třech místech založena teplotní čidla, vyvedená do sedmikolíkoveho konektoru, který je umístěný na muzikusu. Izolační systém vinutí VPI odpovídá teplotní odolnosti třídy 200.



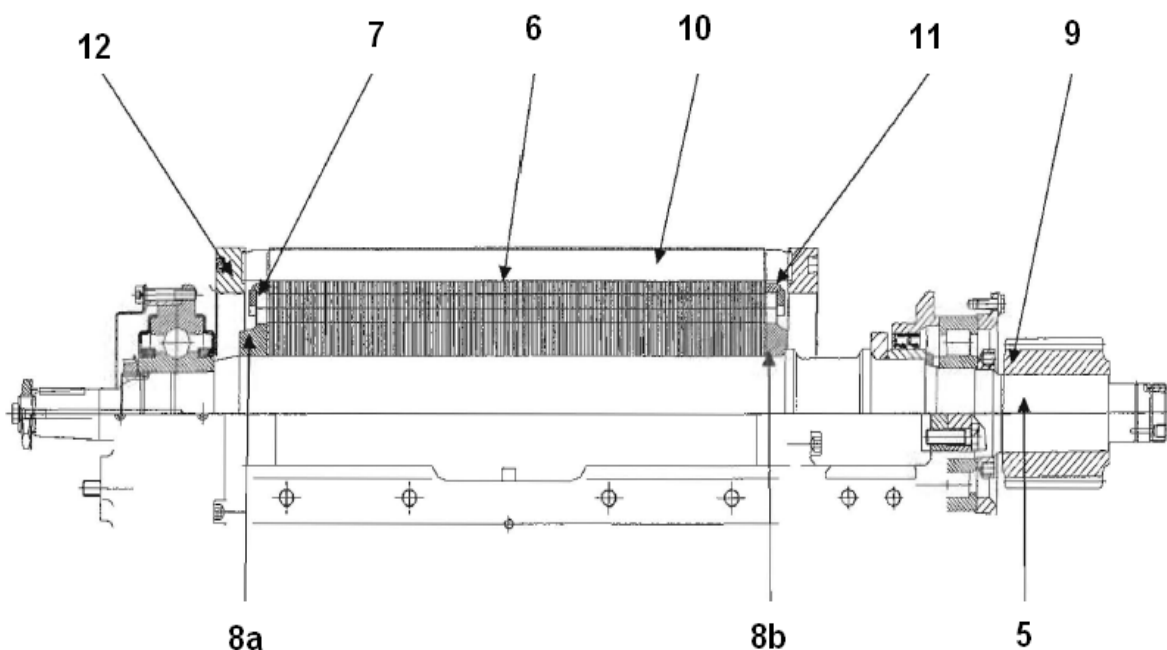
Obr. 3.3 Statorové vinutí vyvedené do konektorů [12.]

Rotor motoru se skládá z hřídele (5) viz. obr. 3.4, na kterém je za tepla nalisován paket rotorových plechů (6), sevřený mezi krajními plechy tloušťky 2 mm (7) talíři rotoru (8a, 8b).

Na přední straně je hřídel ukončena kuželem pro připojení pomocných pohonů, na zadní straně kuželem na kterém je nasazen pastorek (9). Oba konce jsou přizpůsobeny pro hydraulické stahování.

Klece rotoru je z profilových Cu tyčí (10), nalisovaných do polouzavřených drážek plechů rotoru (6), na obou stranách natvrdo připájených do Cu kruhů nakrátko(12). Klece rotoru jsou v drážkách po celé délce upevněny temováním.

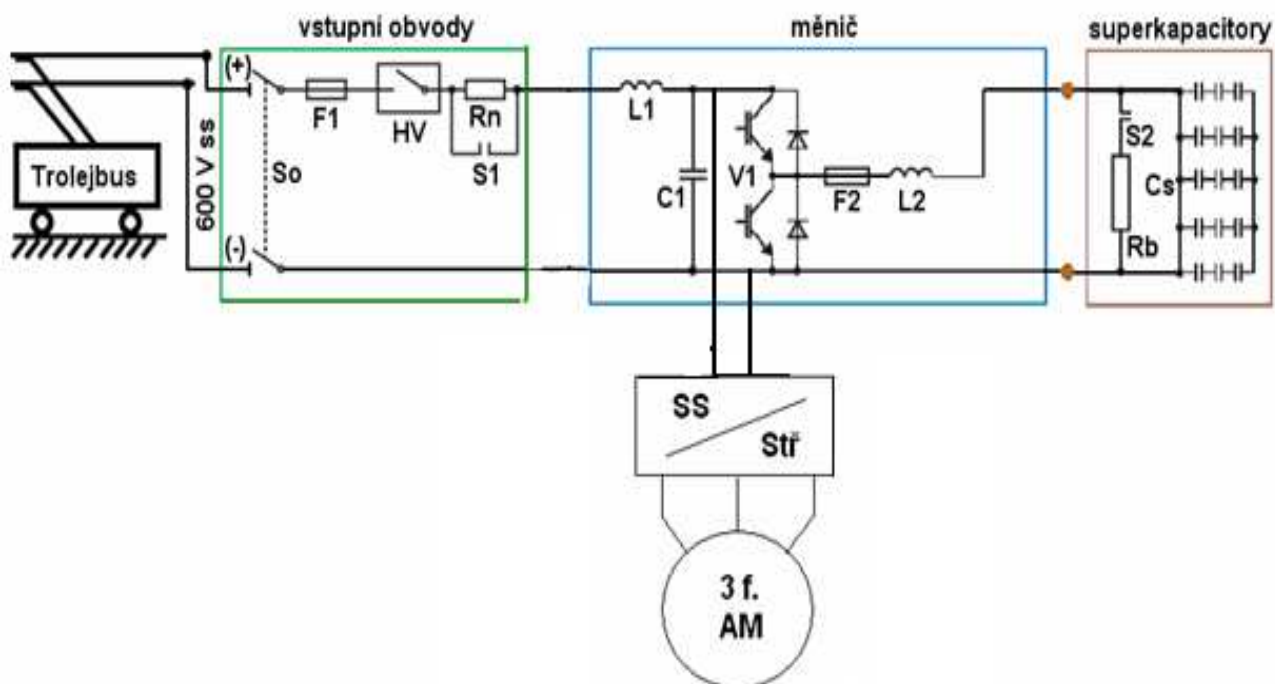
V kruzích jsou drážky pro vyvážení rotoru. Rotor je předem vyvážen segmenty (11), přivařenými k talířům rotoru(8a, 8b) [12.].



obr. 3.4 Řez rotoru asynchronního motoru [12.]

4. Návrh silového obvodu a rekuperačního obvodu

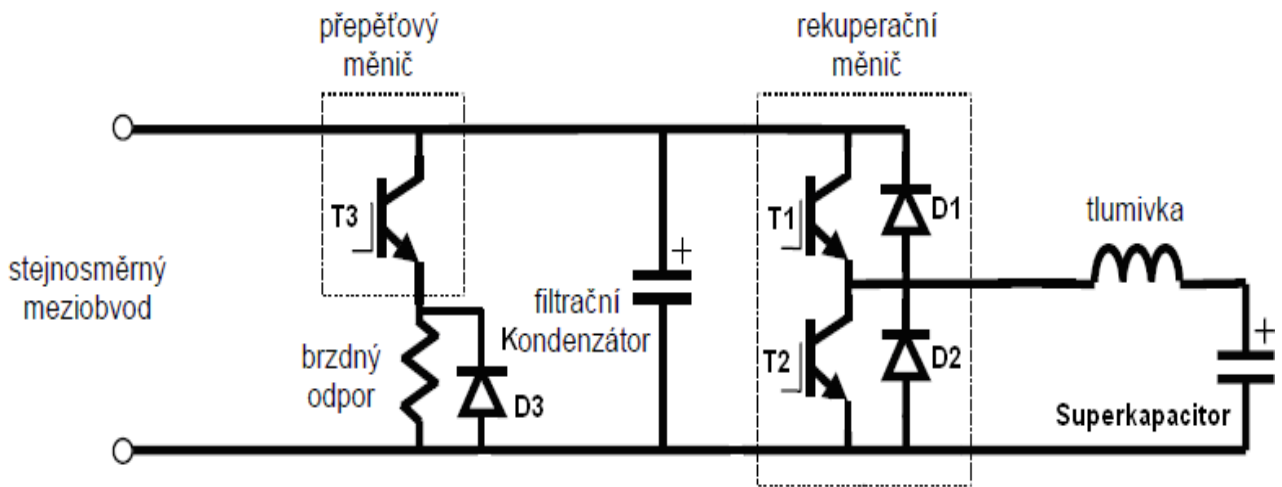
Mým úkolem bylo tedy blokově navrhnout základní uspořádání silových obvodů viz obr. č.4.1



Obr. 4.1 Navržené blokové schéma trolejbusu 28 Tr Solaris s akumulací energie [8.]

Dílčím úkolem je návrh silového schéma rekuperačního obvodu, který bude řídit velikost nabíjecího proudu při ukládání energie a řídit energetický požadavek při vydávání energie. Na obr. 4.2 je schematické znázornění samotného rekuperačního obvodu, který je složen ze tří základních prvků a to měniče napětí, tlumivky a superkapacitoru.

Technickým úkolem tedy bude navrhnout a paralelně připojit rekuperační obvod obr.4.2. Rekuperační obvod tvoří tzv. „čopr“, napěťový měnič, pracující v režimu zvyšujícího a snižujícího napětí, měnič s brzdovým odporem a jeho účelem je maření přebytečné energie z meziobvodu v brzdovém odporu.



Obr.4.2 Schéma rekuperačního obvodu [10.]

4.1 Popis rekuperačního obvodu:

a) Přepěťový obvod

Plní ochrannou funkci meziobvodu resp. k němu připojených zařízení (měničů). Pokud energie dodávaná do meziobvodu není současně odváděna, dochází k nárůstu napětí v meziobvodě. Jakmile dosáhne napětí povolené maximální hodnoty, je třeba výkon dodávaný do meziobvodu začít spotřebovávat a zabránit tak dalšímu zvyšování napětí. Toto je úkolem výkonového přepěťového obvodu, který sestává z přepěťového měniče, tvořeného jedním spínačem IGBT tranzistorem T_3 , a ovládací jednotky.

Ovládací jednotka neustále porovnává napětí meziobvodu s pevně nastavenou mezí a při jejím překročení spíná tranzistor T_3 . Sepnutím tranzistoru T_3 způsobí vybíjení filtračních kondenzátorů do brzdnyho odporu. Energie se tak maří ve formě tepelných ztrát (Joulových) v brzdnyho odporu.

Důvodem proč je dioda D_3 připojena paralelně k brzdnyho odporu je kvůli parazitní indukčnosti odporu, která by mohla způsobit značné přepětí a následný průraz tranzistoru T_3 v okamžiku jeho vypnutí [10].

b) Tlumivka

Funkcí tlumivky je vyhlazení proudu a při zvyšovacím režimu měniče rovněž akumulace energie, potřebná pro jeho funkci.

c) Superkapacitor

Známým problémem sériového spojení kapacitorů jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.2 je riziko nerovnoměrného rozdělení napětí na jednotlivé články řetězce.

Rekuprační měnič (měnič napětí)

Měnič napětí slouží k oddělení dvou odlišných napěťových hladin a umožňuje přenos energie mezi nimi. Důvodem je napěťová nezávislost mezi superkapacitorem a meziobvodem.

Z obr.4.2 je patrné, že superkapacitor je přes tlumivku připojen ke středu větve rekupračního měniče, tvořeného dvěma spínacími prvky (tranzistory T_1 a T_2) s antiparalelními diodami (D_1 a D_2). Dioda D_1 u tranzistoru T_1 zaručuje, že napětí na superkapacitoru nemůže být v ustáleném stavu nikdy vyšší než napětí v meziobvodě (zanedbáme-li prahové napětí diody).

4.2 Pracovní režimy

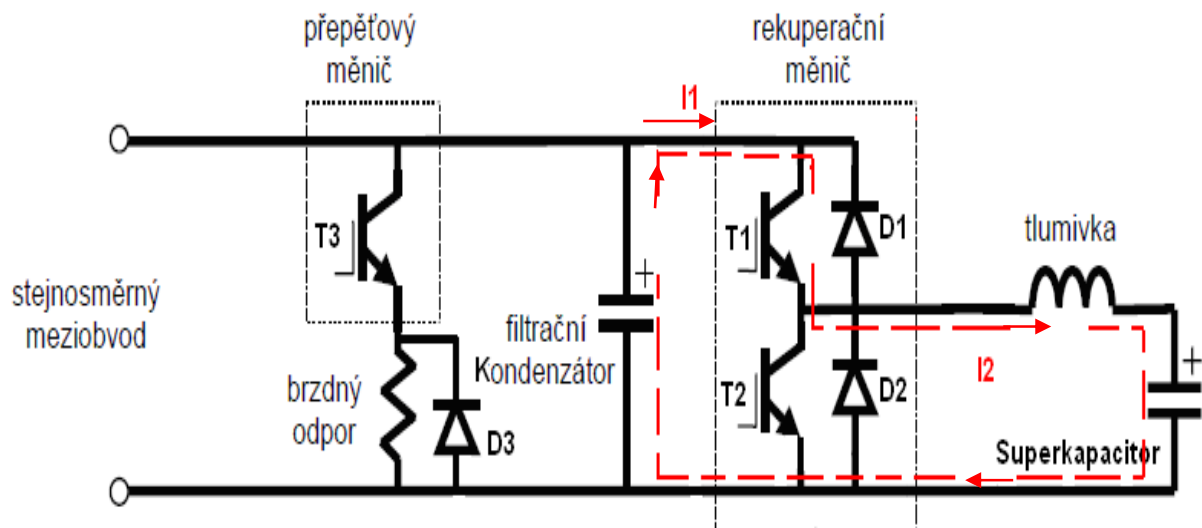
Dle směru toku energie resp. proudu rozlišujeme dva režimy práce.

Při snižovacím režimu přechází energie ze stejnosměrného meziobvodu (přívodem elektrické energie z trolejového vedení) do superkapacitoru a ten se nabíjí.

Při zvyšovacím režimu je tok energie opačný a v takovém případě dochází k vybíjení superkapacitoru.

4.2.1 Nabíjení superkapacitoru z trolejového vedení

Pracuje-li obvod jako nabíjecí, je řízen horní tranzistor T_1 . Dolní tranzistor T_2 a zpětná dioda D_2 se vedení proudu nezúčastňují. Na obr. 4.3 je červenou barvou vyznačen průběh proudu v nabíjecím režimu.



Obr.4.3 Schéma průběhu proudu při nabíjení superkapacitoru

Dle stavu tranzistoru T_1 rozlišujeme dvě situace:

a) tranzistor T_1 sepnut

Proud protéká obvodem tvořeným filtračním kondenzátorem, tranzistorem T_1 , tlumivkou a superkapacitorem.

Proud I_1 je při sepnutém tranzistoru T_1 totožný s proudem I_2 . Při dostatečně vysoké spínací frekvenci a tedy krátké periodě spínání, lze během jednoho spínacího taktu považovat napětí v meziobvodě i napětí na superkapacitoru za konstantní. Proud superkapacitoru lze vyjádřit:

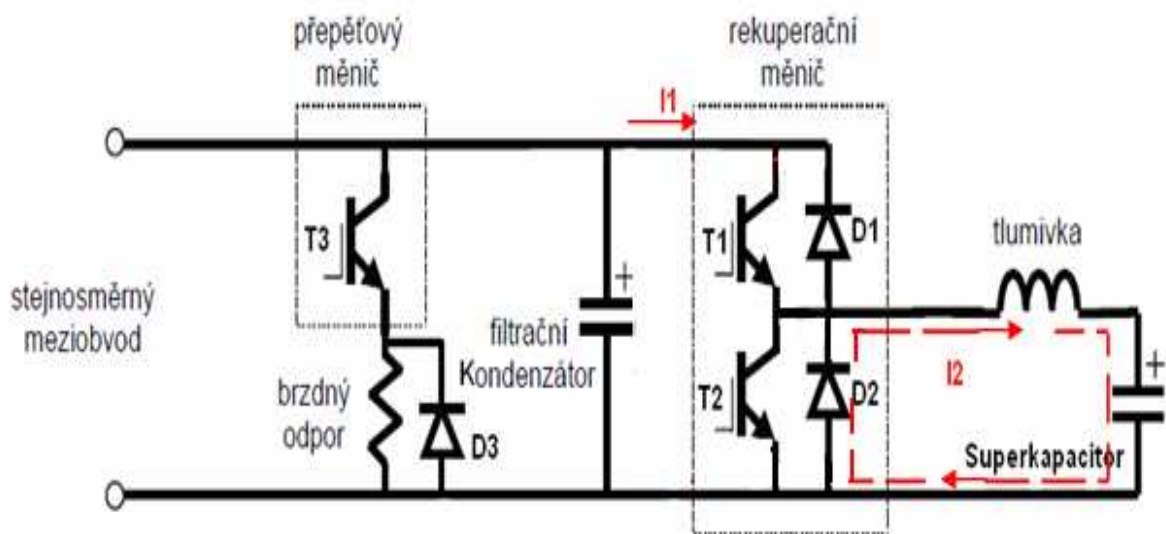
$$U_1 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_2 \quad (3-1)$$

$$i_2 = \frac{(U_1 - U_2)}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-2)$$

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

b) tranzistor T_1 vypnut

V okamžiku vypnutí tranzistoru T_1 se zdrojem energie, který vyvolává proud obvodem, stává tlumivka. Jedná se o energii akumulovanou ve formě magnetického pole. Proud protéká obvodem tvořeným tlumivkou, superkapacitorem a diodou D_2 , vyznačen červenou barvou viz. obr. 4.4.



Obr.4.4 Schéma průběhu proudu při vypnutém tranzistoru T_1 .

Proud I_1 je při vypnutém tranzistoru T_1 nulový. Proud superkapacitorem je opět dán diferenciální rovnicí prvního řádu:

$$0 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_2 \quad (3-3)$$

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

$$i_2 = -\frac{U_2}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_H \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-4)$$

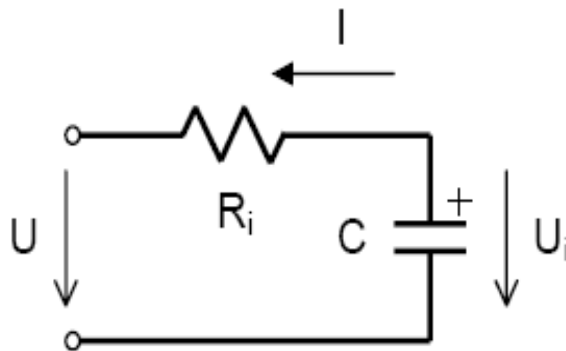
Dosáhne-li proud během doby vypnutí tranzistoru T_1 nulové hodnoty, mluvíme o režimu měniče s přerušovaným proudem.

Při přerušovaném proudě je přenášená energie vzhledem k malé střední hodnotě proudu velmi nízká.

V praxi proto pracuje napěťový měnič téměř výhradně v režimu s nepřerušovaným proudem.

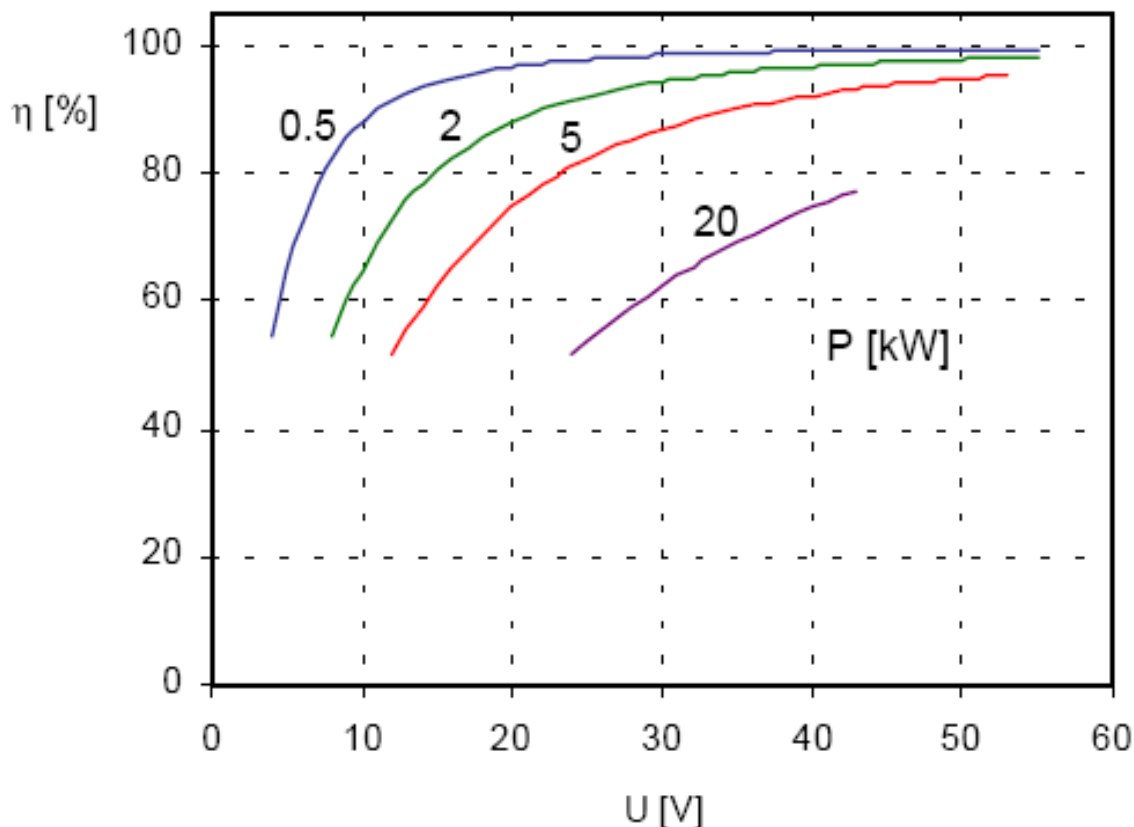
Výkon který jsme schopni odebrát ze superkapacitoru je nižší z důvodu tepelných ztrát na jeho vnitřním odporu. Na obr. 4.5 je náhradní schéma superkapacitoru.

Ztráty vznikající na vnitřním odporu superkapacitoru závisí na velikosti protékajícího proudu. $\Delta P_R = R_i \cdot I^2$ [W, Ω , A]



Obr. 4.5 Náhradní schéma superkapacitoru [10.]

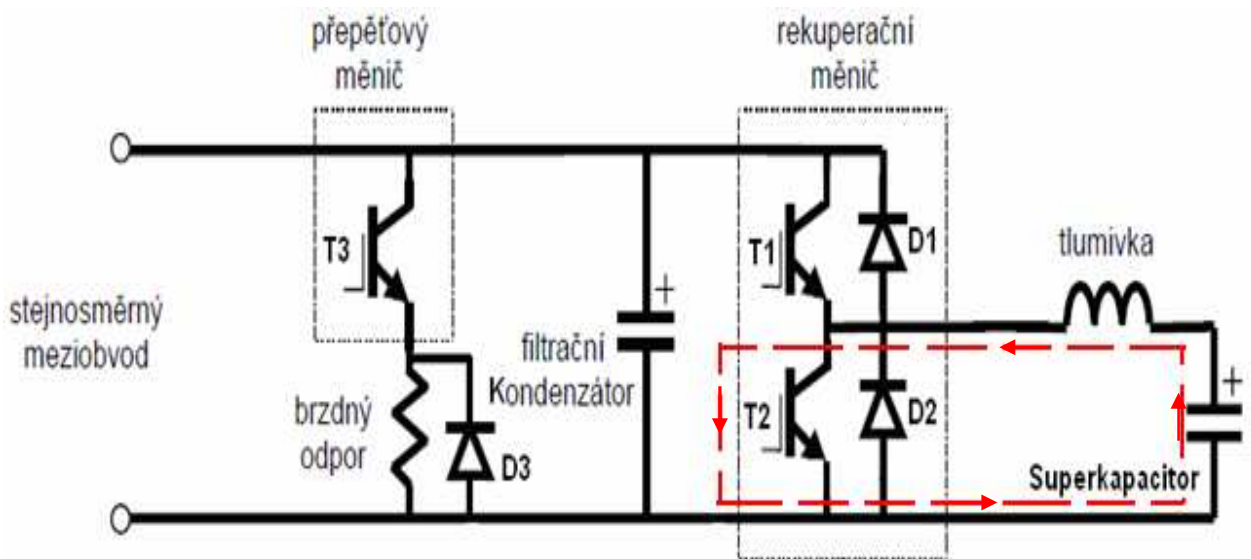
Na obr. 4.6 je vynesena závislost účinnosti superkapacitoru a napětí. Z grafu je patrné, že účinnost superkapacitoru je proměnná v závislosti na velikosti výkonu a napětí.



Obr. 4.6 Závislost účinnosti superkapacitoru na napětí pro různé velikosti výkonu[10.]

4.2.2 Vybíjení superkapacitoru do stejnosměrného meziobvodu

Pracuje-li měnič v režimu vybíjení superkapacitoru, obvod je řízen tranzistorem T_2 . Tranzistor T_1 a dioda D_2 se nezúčastňují vedení proudu, viz. obr. 4.7 jež znázorňuje průběh proudu při sepnutém tranzistoru T_2 .



Obr.4.7 Schéma průběhu proudu při vybíjení superkapacitoru

Dle stavu tranzistoru T_2 lze opět rozlišit dvě situace:

a) tranzistor T_2 sepnut

Proud protéká obvodem tvořeným superkapacitorem, tlumivkou a tranzistorem T_2 . Proud I_1 je při sepnutém tranzistoru T_2 nulový.

Proud superkapacitorem je dán rovnicí:

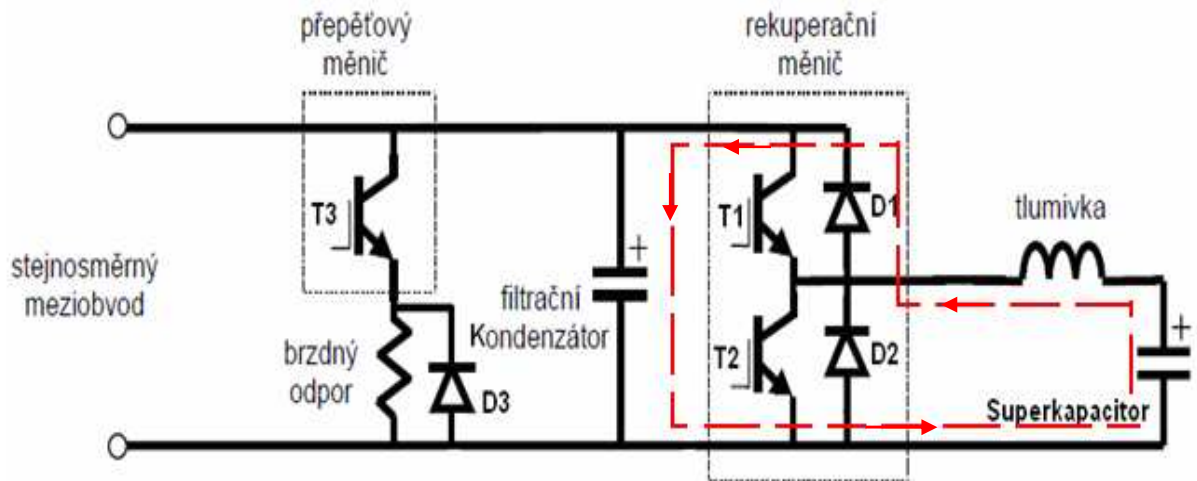
$$U_2 = -R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (3-5)$$

Proud je exponenciálně rostoucí z počáteční minimální hodnoty I_D k ustálené hodnotě $-\frac{U_2}{R}$:

$$i_2 = -\frac{U_2}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-6)$$

b) tranzistor T_2 vypnut

V okamžiku vypnutí tranzistoru T_2 převezme proud diody D_1 . Proud protéká obvodem tvořeným superkapacitorem, tlumivkou, diodou D_2 a filtračním kondenzátorem.



Obr. 4.8 Schéma průběhu proudu při vypnutí tranzistoru T_2

Proud superkapacitorem je opět dán rovnicí:

$$U_2 = -R \cdot i_2 - L \cdot \frac{di_2}{dt} + U_1 \quad (3-7)$$

Jejíž řešením je proud klesající z počáteční maximální hodnoty I_H k hodnotě

$$\frac{U_1 - U_2}{R}$$

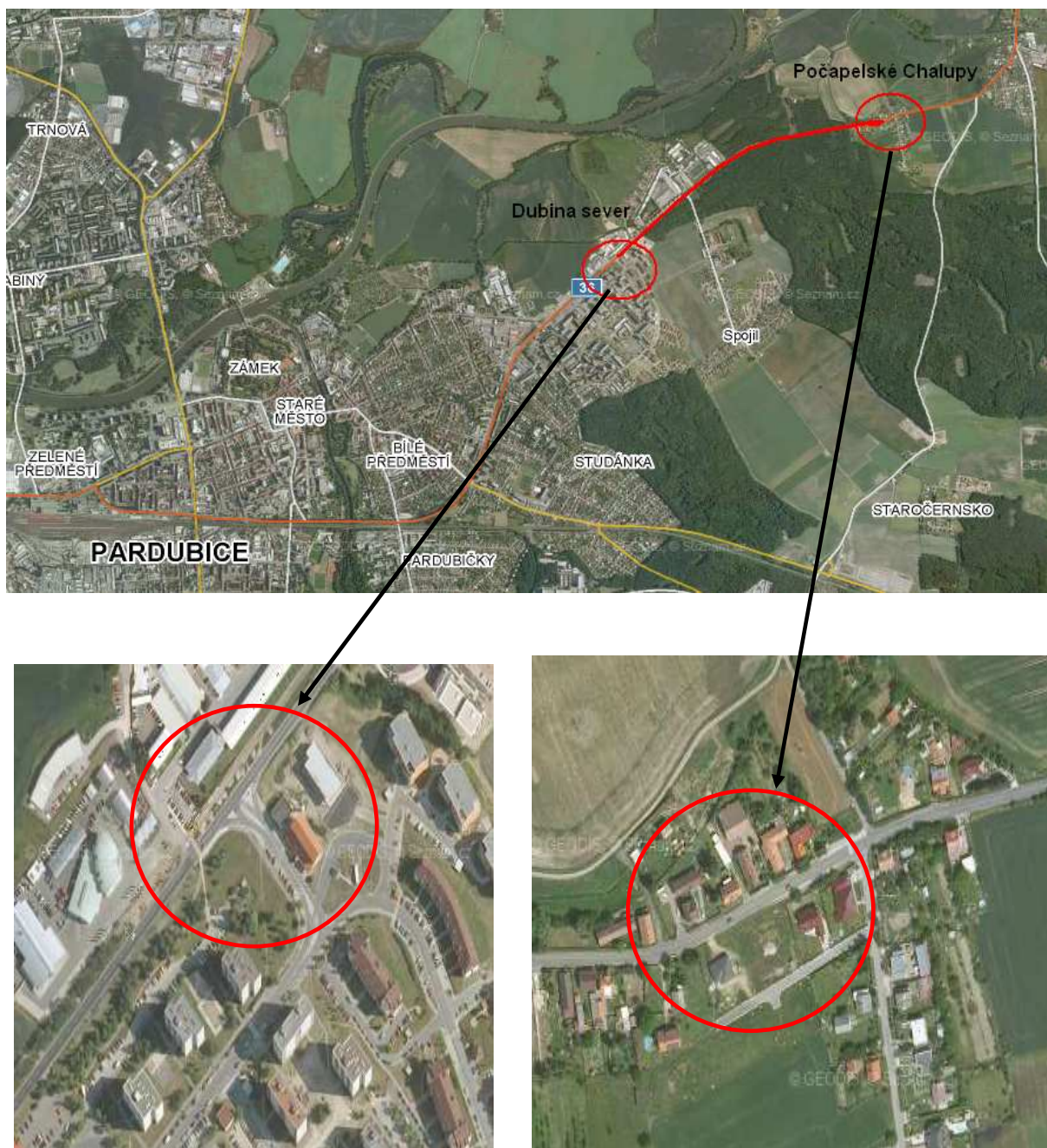
$$i_2 = \frac{U_1 - U_2}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + I_H \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-8)$$

Dosáhne-li proud během doby vypnutí tranzistoru T_2 nulové hodnoty, hovoříme o režimu měniče s přerušovaným proudem. [10.]

5. Plán trasy a výpočet jízdních odporů

5.1 Výběr trasy- analýza traťových poměrů

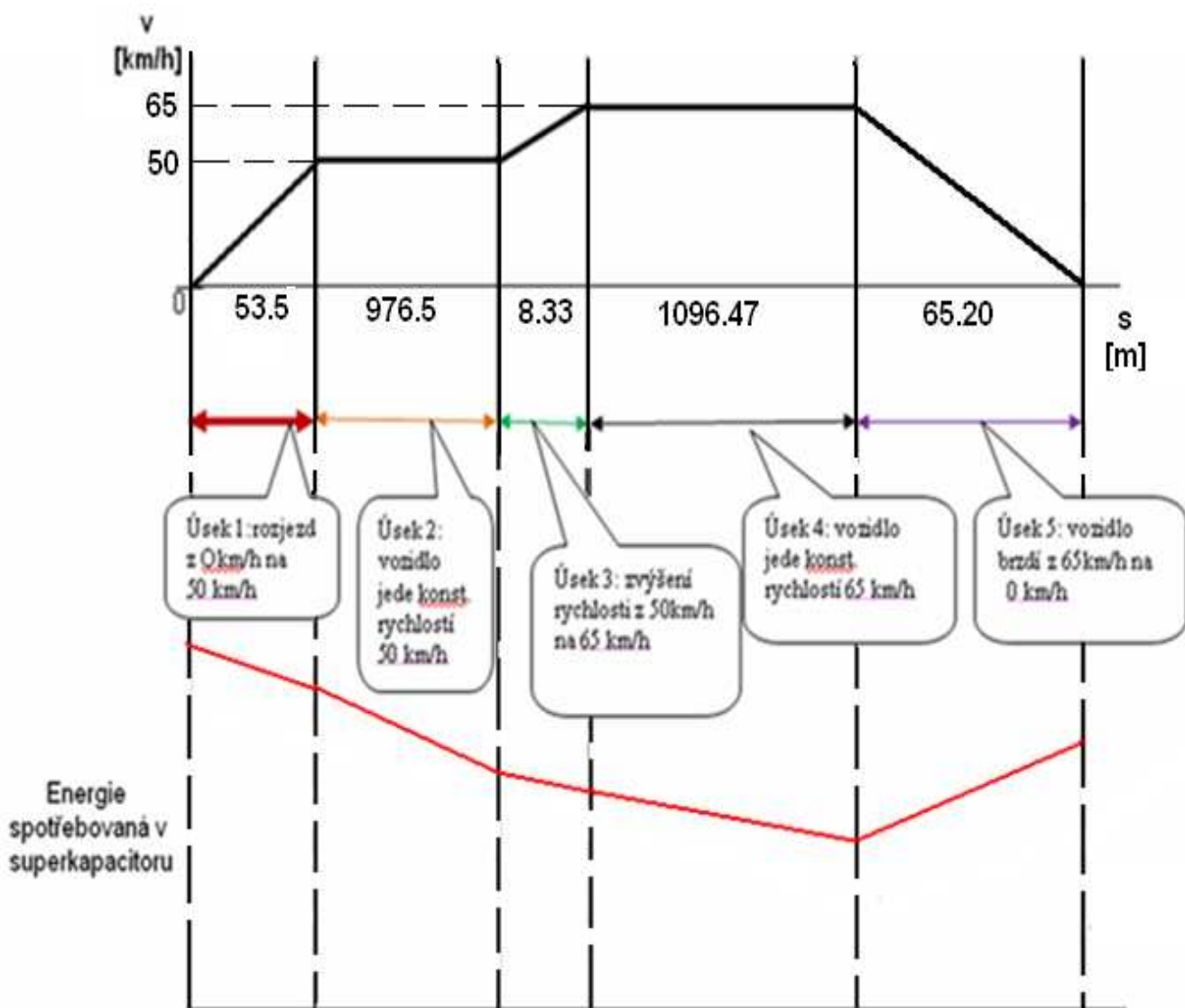
Na obr.5.1 je plán trasy, kterou budeme uvažovat pro dimenzaci superkapacitoru. Zanedbáme odpor jízdy do stoupání a klesání, rovněž zanedbáme odpor v oblouku.



Obr. 5.1 Mapa trasy Pardubice-Dubina_sever – Počapelské Chalupy

Pro přehlednost jsem rozdělil tuto trasu do pěti úseků:

- 1. úsek** – Trolejbus se rozjíždí z 0 km/h na 50 km/h s optimálním zrychlením $1,8 \text{ m/s}^2$.
- 2. úsek** – Trolejbus jede padesátikilometrovou rychlostí do konce obce. Vzdálenost od počátku úseku 1. po konec obce tj. konec úseku 2. je 1,030 km.
- 3. úsek** – Trolejbus se rozjíždí z 50 km/h na max. rychlost tj. 65 km/h se zrychlením 1 m/s^2 .
- 4. úsek** – Trolejbus jede rovnoměrně přímočarým pohybem 65 km/h.
- 5. úsek** – Trolejbus začne brzdít z 65 km/h na 0 km/h se zpomalením $2,5 \text{ m/s}^2$.



Obr. 5.2 Rozdělení úseku na pět částí

5.2 Řešení jednotlivých úseků

Úsek 1: Velikost okamžité rychlosti hmotného bodu je při nulové počáteční rychlosti přímo úměrná času, platí tedy vztah:

$$v = a \cdot t \quad (5-1)$$

$$t_1 = \frac{v}{a} = \frac{50/3,6}{1,8} = 7,71 \text{ s} \quad (5-2)$$

Dráha rovnoměrně zrychleného pohybu se zrychlením o velikosti $a=1,8\text{m/s}^2$ závisí na čase vztahem:

$$s_1 = \frac{1}{2} a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,8 \cdot 7,71^2 = 53,5 \text{ m} \quad (5-3)$$

v – rychlost vozidla [km/h]

a – zrychlení vozidla [m/s^2]

t – doba ujetí dráhy [s]

s – dráha [m]

Úsek 2: Druhý úsek dopočítám tak, že celkový úsek tzn. od počátku rozjezdu po konec obce který činí 1030 m odečtu vzdálenost, kterou trolejbus urazil při rozjezdu z 0 km/h na 50 km/h.

$$s_2 = 1030 - 53,5 = 976,5 \text{ m} \quad (5-4)$$

Tento úsek jede trolejbus rovnoměrným pohybem

$$v = \frac{s}{t} \quad (5-5)$$

$$t_2 = \frac{s_2}{v} = \frac{976,5}{50/3,6} = 70,35 \text{ s} \quad (5-6)$$

Úsek 3: Nyní se trolejbus dostal za hranice obce a tedy akcelaruje z 50 km/h na 65 km/h se zrychlením 1 m/s^2 .

$$t_3 = \frac{v}{a} = (65 - 50)/3,6 = 4,17 \text{ s} \quad (5-7)$$

Ve 3 úseku ujede tedy trolejbus vzdálenost:

$$s_3 = \frac{1}{2} a \cdot t_3^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 4,17^2 = 8,33 \text{ m} \quad (5-8)$$

Úsek 4: Nelze ještě spočítat

Úsek 5: Nyní trolejbus bude brzdit z 65 km/h na 0 km/h s brzdným zpomalením 2,5 m/s²:

$$t_b = \frac{v}{a_b} = \frac{65}{3,6 \cdot 2,5} = 7,22 \text{ s} \quad (5-9)$$

$$s_b = \frac{v^2}{25,92 \cdot a_b} = \frac{65^2}{25,92 \cdot 2,5} = 65,20 \text{ m} \quad (5-10)$$

t_b – čas který je zapotřebí aby vozidlo zastavilo [s]

a_b – brzdné zpomalení [m/s²]

s_b – brzdná dráha [m]

Úsek 4: Dopočítáme 4. úsek tak, že všechny dráhy sečteme a odečteme od celkového úseku, tedy:

$$s_4 = 2200 - (53,5 + 976,5 + 8,33 + 65,20) = 1096,47 \text{ m} \quad (5-11)$$

$$t_4 = \frac{s_4}{v} = \frac{1096,47}{65/3,6} = 60,73 \text{ s} \quad (5-12)$$

5.3 Výpočet jízdního odporu v jednotlivých úsecích

Obecný tvar závislosti p_0 na rychlosti jízdy má tvar

$$p_0 = a + bV + cV^2 \quad [\text{N/kN, km/h}] \quad (5-13)$$

kde **a**, **b**, **c** jsou empiricky zjištěné činitele vyjadřující

a - podíl tření smykového mezi kolem a jízdní drahou

b - podíl tření valivého mezi kolem a jízdní drahou

c - podíl tvořený odporem vzduchu

V je rychlost jízdy [km/h]

Stanovováním číselných hodnot činitelů **a**, **b**, **c** se zabývalo v minulosti mnoho autorů a proto je k dispozici velký počet empirických výrazů.

Obecně lze říci, že pro kolejová vozidla obvykle vystačíme s uvažováním činitelů **a** a **c**, zatím co pro silniční vozidla, případně pro kolejová vozidla MHD s

pryžovými prvky, musíme ještě respektovat charakter pneumatik a pryžových prvků představovaný činitelem **b**.

Pro trolejbusy pak byl odvozen výraz [13.]

$$P_{0,TROL} = a + 0,07 \cdot V + \frac{0,1 \cdot c \cdot S \cdot V^2}{G} \quad [\text{N/kN, km/h}] \quad (5-14)$$

kde **a** závisí na povrchu vozovky

a = 12 na hladkých živičných a betonových dlažbách

a = 14 až 20 na kamenné dlažbě

c má hodnoty

c = 1 pro nezakrytý spodek a hranatý tvar skříně

c = 0,6 pro proudnicový tvar

S – čelní plocha vozidla v [m²]

G – tíha vozidla [kN]

$$P_{0,TROL} = 12 + 0,07 \cdot v + \frac{0,1 \cdot 0,6 \cdot 8,9 \cdot v^2}{14 \cdot 10^3} = \underline{\underline{12 + 0,07 \cdot v + 0,0039v^2}} \quad [\text{N/kN, km/h}] \quad (5-15)$$

Vysvětlivky

P₀měrný jízdní odpor [N/kN]

Pa.....měrná zrychlující síla [N/kN]

Ft.....tažná síla [kN]

ξhodnota poměrné přirážky, u elektrických vozidel MHD cca 1,25 v provozních podmínkách

Pro výpočet energie spotřebované v jednotlivých úsecích, je zapotřebí zjistit tažnou sílu.

1. Úsek:

pro 10 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 10 + 0,0039 \cdot 10^2 = 13,09 \text{ N/kN} \quad (5-16)$$

Pro další výpočty se převede **a** = 1,8m/s² na **a** = 1,8.3,6=6,48 km/h.s

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1,8 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 229,39 \text{ N/kN} \quad (5-17)$$

$$Ft = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (13,09 + 229,39) = 33,30 \text{ kN} \quad (5-18)$$

$$P_{10} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{33,30 \cdot 10}{3,6} = \underline{\underline{92,51}} \text{ kW} \quad (5-19)$$

pro 20 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 20 + 0,0039 \cdot 20^2 = 13,70 \text{ N/kN} \quad (5-20)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1,8 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 229,39 \text{ N/kN} \quad (5-21)$$

$$Ft = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (13,70 + 229,39) = 33,38 \text{ kN} \quad (5-22)$$

$$P_{20} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{33,38 \cdot 20}{3,6} = \underline{\underline{185,44}} \text{ kW} \quad (5-23)$$

pro 30 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 30 + 0,0039 \cdot 30^2 = 17,61 \text{ N/kN} \quad (5-24)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1,8 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 229,39 \text{ N/kN} \quad (5-25)$$

$$Ft = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (17,61 + 229,39) = 33,92 \text{ kN} \quad (5-26)$$

$$P_{30} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{33,92 \cdot 30}{3,6} = \underline{\underline{282,69}} \text{ kW} \quad (5-27)$$

pro 40 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 40 + 0,0039 \cdot 40^2 = 21,04 \text{ N/kN} \quad (5-28)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1,8 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 229,39 \text{ N/kN} \quad (5-29)$$

$$Ft = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (21,04 + 229,39) = 34,39 \text{ kN} \quad (5-30)$$

$$P_{40} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{34,39 \cdot 40}{3,6} = \underline{\underline{382,16}} \text{ kW} \quad (5-31)$$

pro 50 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 50 + 0,0039 \cdot 50^2 = 25,25 \text{ N/kN} \quad (5-32)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1,8 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 229,39 \text{ N/kN} \quad (5-33)$$

$$F_t = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (25,25 + 229,39) = 34,97 \text{ kN} \quad (5-34)$$

$$P_{50} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{34,97 \cdot 50}{3,6} = \underline{\underline{485,69 \text{ kW}}} \quad (5-35)$$

Střední výkon pro 1. úseku:

$$P_{1.úsek} = \frac{P_{10} + P_{20} + P_{30} + P_{40} + P_{50}}{5} = \underline{\underline{285,70 \text{ kW}}} \quad (5-36)$$

Energie spotřebovaná v 1. úseku (zrychlení z 0 na 50km/h): energie čerpaná ze superkapacitoru bude zvětšena o ztráty v trakčním motoru:

$$W_{1.úsek} = \frac{P_{1.úsek} \cdot t_{1.úsek}}{\eta_{mot.}} = \frac{285,70 \cdot 7,71}{0,88} = 2503,12 \text{ kWs} = \underline{\underline{0,69 \text{ kWh}}} \quad (5-37)$$

Takto spočítáme energii i v druhém, třetím a čtvrtém úseku.

2. Úsek (jízda na zbývajícím úseku, trolejbus jede rovnoměrně přímočaře po hranici obce 50 km/h):

Výkon pro 2. úsek

$$F_t = G \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 25,25 = 3467,83 \text{ N} \quad (5-38)$$

$$P_{2.úsek} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{3467,83 \cdot 50}{3,6} = 48,16 \text{ kW} \quad (5-39)$$

Energie spotřebovaná ve 2. úseku:

$$W_{2.úsek} = \frac{P_{2.úsek} \cdot t_{2.úsek}}{\eta_{mot.}} = \frac{48,16 \cdot 70,35}{0,88} = 3850,06 \text{ kWs} = \underline{\underline{1,07 \text{ kWh}}} \quad (5-40)$$

3. Úsek: (trolejbus bude zvyšovat svoji rychlost z 50 km/h na max. 65 km/h se zrychlením 1 m/s^2)

pro 55 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 55 + 0,0039 \cdot 55^2 = 27,65 \text{ N/kN} \quad (5-41)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 127,44 \text{ N/kN} \quad (5-42)$$

$$F_t = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (27,65 + 127,44) = 21,30 \text{ kN} \quad (5-43)$$

$$P_{55} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{21,30 \cdot 55}{3,6} = \underline{\underline{325,42}} \text{ kW} \quad (5-44)$$

pro 60 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 60 + 0,0039 \cdot 60^2 = 30,24 \text{ N/kN} \quad (5-45)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 127,44 \text{ N/kN} \quad (5-46)$$

$$F_t = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (30,24 + 127,44) = 21,66 \text{ kN} \quad (5-47)$$

$$P_{60} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{21,66 \cdot 60}{3,6} = \underline{\underline{361}} \text{ kW} \quad (5-48)$$

pro 65 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 65 + 0,0039 \cdot 65^2 = 33,03 \text{ N/kN} \quad (5-49)$$

$$P_a = 28,325 \cdot a \cdot \xi = 28,32 \cdot 1 \cdot 3,6 \cdot 1,25 = 127,44 \text{ N/kN} \quad (5-50)$$

$$F_t = G \cdot (p_0 + p_a) = 14 \cdot 9,81 \cdot (33,03 + 127,44) = 22,04 \text{ kN} \quad (5-51)$$

$$P_{65} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{22,04 \cdot 65}{3,6} = \underline{\underline{397,94}} \text{ kW} \quad (5-52)$$

Střední výkon pro 3. úsek:

$$P_{3.úsek} = \frac{P_{55} + P_{60} + P_{65}}{3} = \underline{\underline{361,45}} \text{ kW} \quad (5-53)$$

Energie spotřebovaná ve 3. úseku:

$$W_{3.úseku} = \frac{P_{3.úsek} \cdot t_{3.úsek}}{\eta_{mot.}} = \frac{361,45 \cdot 4,17}{0,88} = 1712,78 \text{ kWs} = \underline{\underline{0,48}} \text{ kWh} \quad (5-54)$$

4. Úsek:

Výkon pro 4. úsek:

$$F_t = G \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 25,25 = 3467,83 \text{ N}$$

$$P_{4.úsek} = \frac{F_t \cdot v}{3,6} = \frac{3467,83 \cdot 65}{3,6} = \underline{\underline{62,61 \text{ kW}}} \quad (5-55)$$

Energie spotřebovaná ve 4. úseku:

$$W_{4.úsek} = \frac{P_{4.úsek} \cdot t_{4.úsek}}{\eta_{mot.}} = \frac{62,61 \cdot 60,73}{0,88} = 4820,80 \text{ kWs} = \underline{\underline{1,20 \text{ kWh}}} \quad (5-56)$$

5. Úsek:

Energie na začátku 5. úseku je: $W_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \xi = \frac{1}{2} \cdot 14 \cdot 10^3 \cdot 65^2 \cdot 1,25 =$
 $= \underline{\underline{36\,968\,750 \text{ J}}} \quad (5-57)$

Brzdná síla:

pro 65 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 65 + 0,0039 \cdot 65^2 = 33,03 \text{ N/kN} \quad (5-58)$$

$$F_{b65} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 33,03 = 5,67 \text{ kN} \quad (5-59)$$

pro 60 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 60 + 0,0039 \cdot 60^2 = 30,24 \text{ N/kN} \quad (5-60)$$

$$F_{b60} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 30,24 = 5,19 \text{ kN} \quad (5-61)$$

pro 50 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 50 + 0,0039 \cdot 50^2 = 25,25 \text{ N/kN} \quad (5-62)$$

$$F_{b50} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 25,25 = 4,33 \text{ kN} \quad (5-63)$$

pro 40 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 40 + 0,0039 \cdot 40^2 = 21,04 \text{ N/kN} \quad (5-64)$$

$$F_{b40} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 21,04 = 3,61 \text{ kN} \quad (5-65)$$

pro 30 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 30 + 0,0039 \cdot 30^2 = 17,61 \text{ N/kN} \quad (5-66)$$

$$F_{b50} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 17,61 = 3,02 \text{ kN} \quad (5-67)$$

pro 20 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 20 + 0,0039 \cdot 20^2 = 13,70 \text{ N/kN} \quad (5-68)$$

$$F_{b50} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 13,70 = 2,35 \text{ kN} \quad (5-69)$$

pro 10 km/h

$$P_0 = 12 + 0,07 \cdot v + 0,0039 \cdot v^2 = 12 + 0,07 \cdot 10 + 0,0039 \cdot 10^2 = 13,09 \text{ N/kN} \quad (5-70)$$

$$F_{b50} = G \cdot \xi \cdot p_0 = 14 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 13,09 = 2,25 \text{ kN} \quad (5-71)$$

Střední brzdná síla v 5. úseku:

$$Fb_{5úsek} = \frac{Fb_{65} + Fb_{60} + Fb_{50} + Fb_{40} + Fb_{30} + Fb_{20} + Fb_{10}}{7} = \underline{\underline{3,77}} \text{ kN} \quad (5-72)$$

Energie $W_{5.úsek}$ rekuperovaná do superkapacitoru při brzdění se sníží o účinnost trakčního motoru a superkapacitoru, která nabývá hodnot v intervalu $\eta = 95 - 98\%$

$$W_{5úsek} = Fb_{5.úsek} \cdot s_b \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{supcap} = 3,77 \cdot 65,20 \cdot 0,88 \cdot 0,965 = \underline{\underline{208,74}} \text{ kJ} \quad (5-73)$$

Energie dodaná do superkapacitoru při brzdění:

$$W_{SC} = W_k - W_{5.úsek} = 36\,968\,750 - 208\,736 = 36\,760\,014 \text{ J} \quad (5 - 74)$$

Rekupační brzdu nebude možné použít do úplného zastavení, neboť regulace brzdné síly je v této fázi obtížná. Brzda přejde automaticky na pneumatickou brzdu, aby bylo možno vozidlo zastavit.

Budeme ukládat do superkapacitoru 80% brzdné energie tzn. $W_{SC} = \underline{\underline{29\,408\,011}} \text{ J}$

5.4 Varianta A – uložení energie do superkapacitoru

S ohledem na klesající účinnost přečerpávání energie při klesajícím napětí bude tento komponent navržen k vybití na 50% jmenovitého napětí

superkapacitoru. Vzhledem k tomu, že energie superkapacitoru je obecně dána vztahem $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$ a při počáteční hodnotě napětí U bude tedy dodržena podmínka vybíjení na $\frac{U}{2}$.

Energii superkapacitoru lze potom odvodit:

$$W_{SC} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left[U^2 - \left(\frac{U}{2} \right)^2 \right] = \frac{3}{8} \cdot C \cdot U^2 \quad [\text{J, F, V}] \quad (5 - 75)$$

Z toho kapacita C pro napětí $U = 400\text{V}$:

$$C = \frac{8 \cdot W_{SC}}{3 \cdot U^2} = \frac{8 \cdot 29408011}{3 \cdot 400^2} = \underline{\underline{490,13 \text{ F}}} \quad (5 - 76)$$

Dále je nutno počítat s výkonovou rezervou pro nepředvídanou dopravní situaci, proto zvedneme kapacitu o 20%.

Hodnota superkapacitoru s 20% rezervou činí 588,16 F

Toto je hodnota superkapacitoru v tom případě, že bychom uvažovali dobíjení superkapacitoru na konečné stanici, v našem případě na zastávce Počapelské Chalupy napájecím zařízením.

Pokud bychom nenabíjeli akumulátor na konečné stanici, museli bychom počítat s dvojnásobnou hodnotou superkapacitoru, tzn. pro cestu tam i zpět. V takovém případě by hodnota činila **1176,31 F**.

V našem případě budeme uvažovat s druhou variantou, tzn. nadimenzování superkapacitoru na dvojnásobnou hodnotu, z důvodu úspory na výstavbu dobíjecího agregátu.

Počet superkapacitorů:

$$n_{\text{série}} = \frac{U_{\text{celk}}}{U_{\text{článek}}} = \frac{400}{2,7} = \underline{\underline{148 \text{ ks}}} \quad (5 - 77)$$

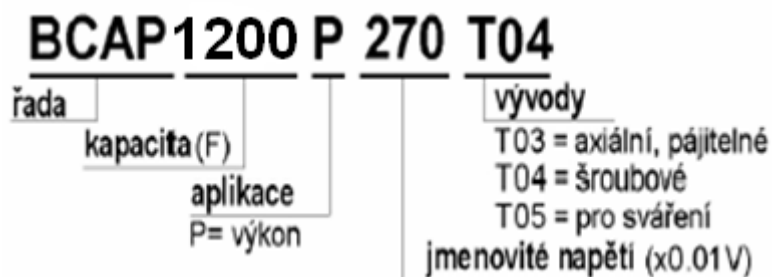
$n_{\text{série}}$ [ks] – počet sériově zapojených článků superkapacitoru

U_{celk} [V] – celkové napětí

$U_{\text{článek}}$ [V] – napětí na článek

Z výše vypočítané hodnoty superkapacitoru vyplývá, že nejvhodnějším typem superkapacitoru firmy Maxwell je BCAP 1200 P270 T04.

Vysvětlivky značení superkapacitoru:[16.]



Parametry superkapacitoru BCAP 1200 P270 T04: [16.]

Kapacita.....	1200 F +20%
Jmenovité napětí.....	2,7 V
Zkratový proud.....	3750 A
Uložená energie.....	4,05 Wh/kg
Špičkový výkon dodávaný do zátěže.....	13,8 kW/kg
Rozměry.....	74 mm x Ø 60 mm
Hmotnost.....	300 g
Pracovní teplota.....	- 40 až +65°C
Cena za článek.....	40 \$ (cca 790,- Kč)



Obr. 5.3 Článek superkapacitoru BCAP firmy Maxwell [16.]

Celková hmotnost všech článků superkapacitoru (bez spojovacích a zástavbových dílů):

$$m_{celk} = m_{článek} \cdot n_{serie} = 0,300 \cdot 148 = \underline{\underline{44,4}} \text{ kg} \quad (5 - 78)$$

m_{celk} [kg] – celková hmotnost všech článků superkapacitoru

$m_{článek}$ [kg] – hmotnost jednoho článku

5.4 Varianta B – uložení energie do akumulátoru NiMH

Důvod proč jsem zvolil tento typ elektrochemického akumulátoru jako druhý možný navrhovaný zdroj energie je ten, že se jedná v současné době o nejužívanější akumulátor v hybridních pohonech. Tento typ akumulátor se využívá u autobusů, nákladních automobilů, lodí i hybridních tramvajových systémů.

Výhodami tohoto typu akumulátoru je:

- Vysoký výkon
- Vysoká životnost
- Bezúdržbovost

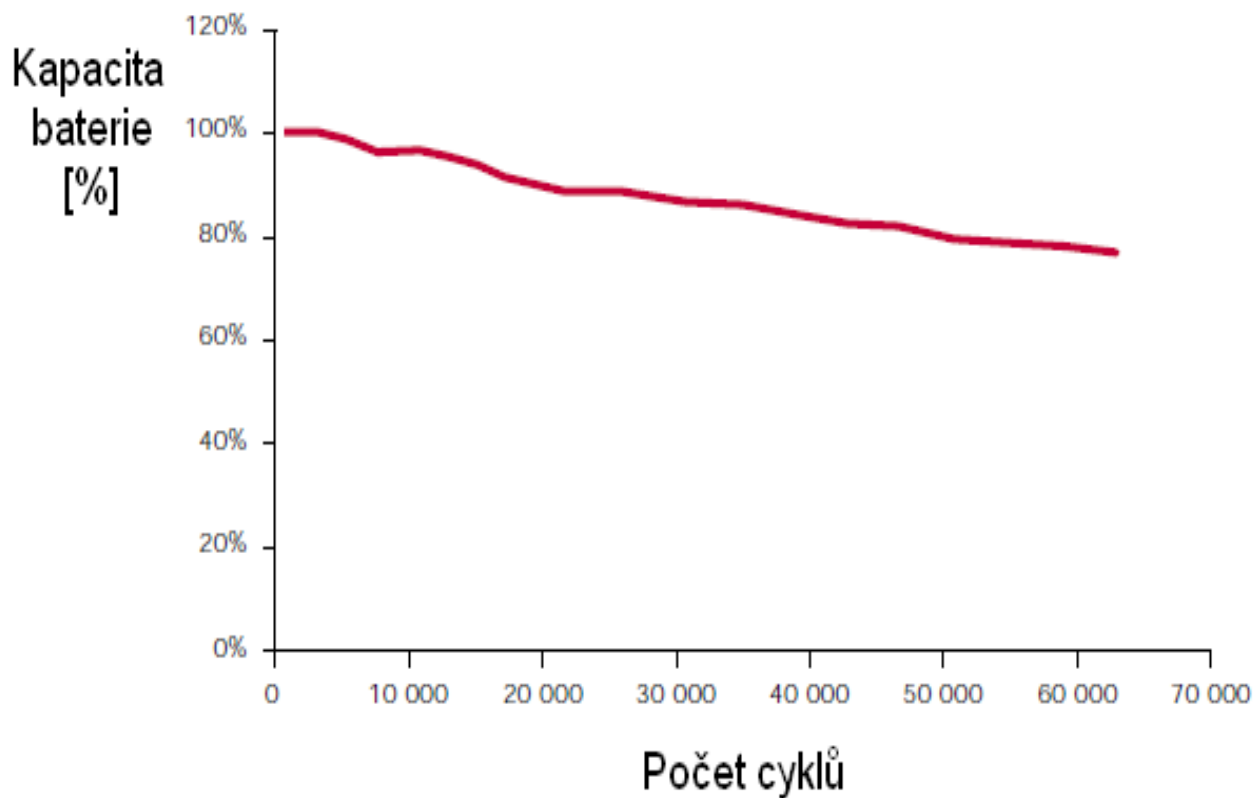
Celkové napětí akumulátoru energie je opět 400 V, což odpovídá hodnotě stejnosměrného meziobvodu. Pro dosažení hodnoty napětí 400 V je zapotřebí články baterie zapojit stejně jako superkapacitory do série.

Parametry elektrochemického akumulátoru NiMH saft NHP 5-680 [17.]:

Kapacita baterie.....	68 Ah
Jmenovité napětí.....	6 V
Maximální 5-ti minutový proud.....	400 A
Maximální 30-ti sekundový proud	1000 A
Uložená energie.....	50 Wh/kg
Špičkový výkon dodávaný do zátěže.....	520 W/kg
Rozměry (výška x šířka x délka).....	165 x 169 x 173 mm
Hmotnost.....	9 kg
Cena za baterii.....	cca 4300,-Kč



Obr. 5.4 Elektrochemická akumulátorová baterie NiMH Saft NHP 5-680 [17.]



Obr. 5.5 Závislost kapacity NiMH baterie na počtu cyklů [17.]

Počet sériově zapojených baterií:

$$n_{\text{serie}} = \frac{U_{\text{celk}}}{U_{\text{článek}}} = \frac{400}{6} = \underline{\underline{67}} \text{ ks} \quad (5 - 79)$$

n_{serie} [ks] – počet sériově zapojených superkapacitorů

U_{celk} [V] – celkové napětí

$U_{\text{článek}}$ [V] – napětí na článek

Použitelná energie uložená v baterii NiMH:

$$E = Q \cdot U_{\text{celk}} \cdot \eta_p = 68 \cdot 400 \cdot 0,8 = \underline{\underline{21,76}} \text{ kWh} \quad (5 - 80)$$

E [Wh] – použitelná energie

Q [Ah] – kapacita baterie

η_p – využitelnost uložené energie

Maximální výkon dodávaný bateriemi po dobu 5-ti minut:

$$P_{5\text{min}} = U_{\text{celk}} \cdot I_{5\text{min.}} = 400 \cdot 400 = \underline{\underline{160}} \text{ kW} \quad (5 - 81)$$

$P_{5\text{min}}$ [W] – 5-ti minutový výkon

$I_{5\text{min.}}$ [A] – maximální 5-ti minutový proud 400 A

Špičkový 30-ti sekundový výkon dodávaný bateriemi:

$$P_{\text{peak}} = U_{\text{celk}} \cdot I_{30s} = 400 \cdot 1000 = \underline{\underline{400}} \text{ kW} \quad (5 - 82)$$

P_{peak} [W] – špičkový výkon

I_{30s} [A] – maximální proud 1000 A po dobu 30 sekund

Celková hmotnost akumulátoru (bez spojovacích a zástavbových dílů):

$$m_{\text{celk}} = m_{\text{článek}} \cdot n_{\text{serie}} = 9 \cdot 67 = \underline{\underline{603}} \text{ kg} \quad (5 - 83)$$

m_{celk} [kg] – celková hmotnost superkapacitorů

$m_{\text{článek}}$ [kg] – hmotnost jednoho článku

Závěr

V první části diplomové práce jsem se zabýval analýzou akumulace elektrické energie a následně jsem provedl srovnání jednotlivých typů akumulátorů.

V druhé části popisuji princip, vlastnosti a možné způsoby využití superkapacitorů, dále jsem popsal problematiku rozdělení napětí při sériovém řazení těchto akumulátorů energie.

Ve třetí části této diplomové práce jsem se zaměřil na principiální činnosti rekuperačního obvodu, tzn. průběhy proudů v obvodu při nabíjení superkapacitoru z trolejového vedení a jeho vybíjení.

Ve čtvrté části jsem se zabýval samotným návrhem a dimenzací superkapacitoru, kdy jsem trasu rozdělil do pěti úseků a spočítal v jednotlivých úsecích trakční odpory a energii spotřebovanou na ujetí jednotlivých úseků. V posledním pátém úseku jsem uvažoval s vrácením přebytečné energie do superkapacitoru při brzdění pomocí rekuperace a to v intervalu z 65 km/h na 0 km/h.

V této práci byly navrženy dvě varianty akumulace energie a to superkapacitoru a Nikl-metalhydridové baterie. Na základě výpočtů, které jsem provedl v diplomové práci a parametrů z katalogových listů od výrobců jednotlivých akumulčních prvků jsem zjistil následující:

- Cena článku superkapacitoru typu BCAP 1200 P270 T04 od firmy Maxwell činí cca 790,-Kč, počet těchto článků v tomto konkrétním případě je zapotřebí 148 ks, tzn. že náklady na pořízení superkapacitorů činí cca 116 920,- Kč bez spojovacích a zástavbových dílů.
- Cena článku Nikl-metalhydridové baterie typu Saft NHP 5-680 od firmy SAFT činí cca 4300,-Kč, počet těchto článků je zapotřebí 67 ks, tzn. že náklady na pořízení tohoto akumulčního prvku činí cca 288 100,- Kč bez spojovacích a zástavbových dílů.
- Třetí variantou by byla i možnost zatrolejování navrhovaného úseku. Cena ovšem činí cca 10 -15 mil.Kč na 1km, v závislosti na počtu a náročnosti křižovatek, oblouků apod. V našem případě by cena zatrolejování úseku činila cca 25 mil.Kč.

Z výše uvedené bilance vyplývá, že pro navrhovaný úsek Pardubice Dubina sever – Počapelské Chalupy by bylo ekonomicky výhodnější využití superkapacitoru od firmy Maxwell BCAP 1200 P270 T04.

Seznam literatury

- [1.] Duda, V.: Vlastnosti superkapacitorů. Ročníkový projekt II., Pardubice UPCE 2010
- [2.] Černohorský, T. Hybridní posunovací lokomotiva, Diplomová práce, Pardubice DFJP 2009
- [3.] Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení, dostupné 25.3.2010 z http://stag.zcu.cz/fel/kae/enz/texty_folie/Texty/Akum_Li-ion.pdf
- [4.] Lukaš, T. Návrh elektrického rekuperačního pohonu vysokozdvížného vozíku, Diplomová práce, Pardubice DFJP 2009
- [5.] Jefferson, C.M., Barnard, R.H.: Hybrid vehicle propulsion, WIT Press, Southampton, 2002, ISBN 1-85312-887-2
- [6.] Parkhideh, B.: Storage Technologies for Hybrid Electric Buses, Rheinisch-Westfalische Technische Hochschule Aachen – institute für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, 2006
- [7.] Čeřovský, Z., Pavelka, V., Podmínky pro vybíjení superkondenzátorů použitých v hybridních elektrických vozidlech, dostupné 15.5.2010 z http://www.3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap2_PPVS.pdf
- [8.] Mašek Z., Gregora, S., Michl, J., Dvořák, K., Superkapacity v dopravní technice, Vědeckotechnický sborník ČD č.25/2008. Univerzita Pardubice, dostupné z <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts25>
- [9.] Zásady a postupy při měření superkapacitorů od firmy Maxwell dostupné 15.5.2010 z <http://www.jelektronik.sk/produkty-databaza/4.Pas%EDvne%205%FA%E8iastky/superkapacity%20maxwell.pdf>
- [10.] Pavelka, V., Rekuperační systém se superkondenzátorem, Závěrečná zpráva studijní etapy doktorandského studia, ČVUT Praha 2003, dostupné 27.3.2010 http://www.3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap4_RSSS.pdf
- [11.] Základní technické parametry trolejbusu tr 28 Solaris pro Pardubice, dostupné <http://www.skoda.cz/holding/produkty/e31651/skoda-28-tr-solaris-aid2805.html>
- [12.] Materiály a typové výkresy poskytnuté Dopravním podnikem města Pardubice
- [13.] Jansa, F., Elektrická zařízení hnacích vozidel MHD, Nakladatelství dopravy a spojů Praha 1986 UD-31-044-86

- [14.] Široký, J.,Mechanika v dopravě II., příklady, Ostrava, Ediční středisko VŠB-TU Ostrava 2006, ISBN 80-248-1252-5
- [15.] Drábek, J., Dynamika a energetika elektrické trakce, Bratislava, Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury Bratislava 1987, 063-773-87
- [16.] Superkapacity Maxwell, dostupné <http://www.maxwell.com>
- [17.] Akumulátorové baterie SAFT, dostupné <http://www.saftbatteries.com>
- [18.] Dvořák, P., Superkondenzátory s nanomateriály, Diplomová práce, VUT Brno 2007

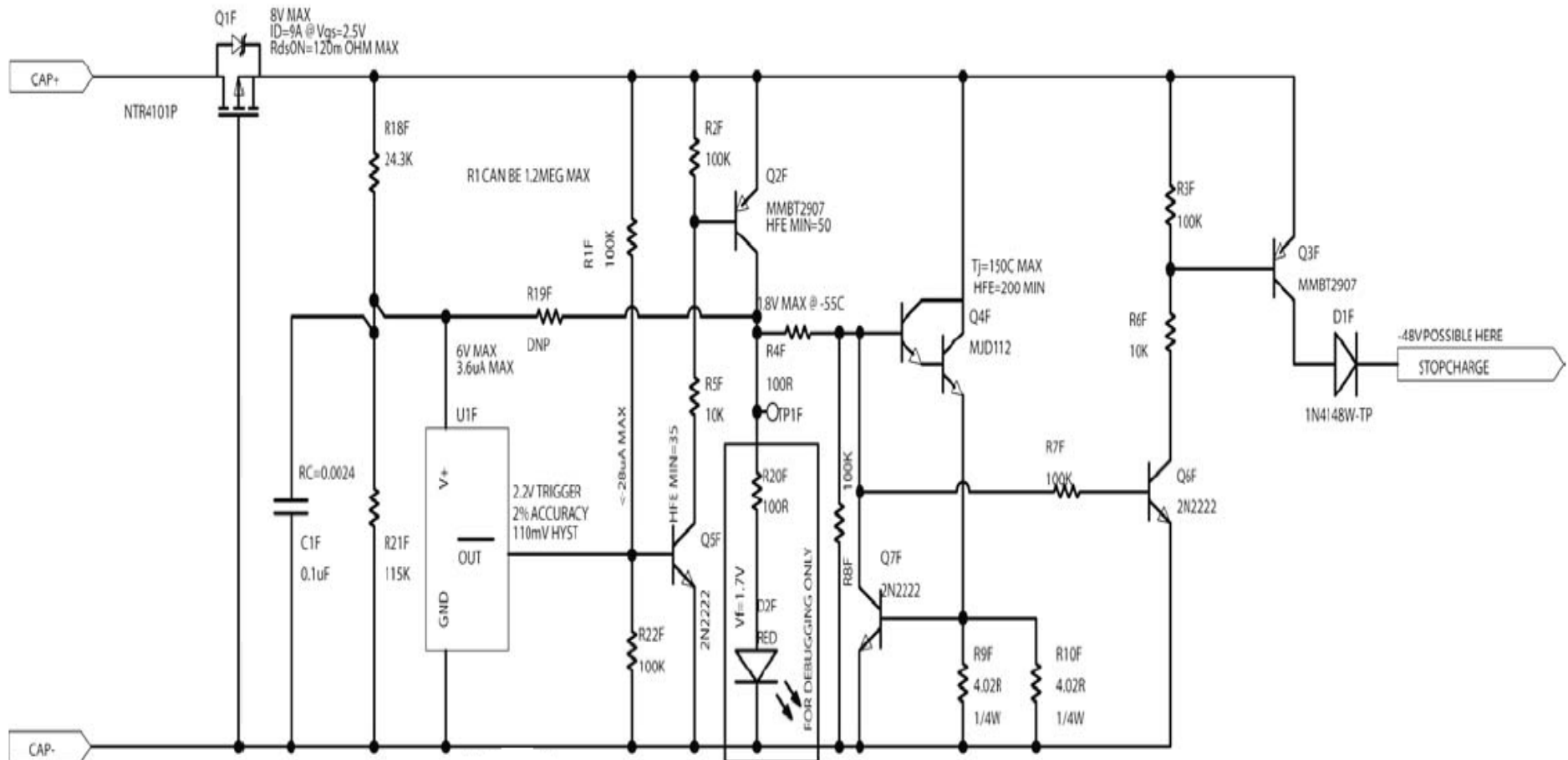
Seznam obrázků

Obr. 1.1	Konstrukce olověného akumulátoru.....	12
Obr. 1.2	Typická vybíjecí křivka akumulátoru Li-ion.....	14
Obr. 1.3	Porovnání vlastností nejpoužívanějších typů akumulátorů.....	15
Obr. 1.4	Schéma setrvačníku.....	16
Obr. 1.5	Řez superkapacitorovým článkem.....	18
Obr. 1.6	Průběh úbytku napětí superkapacitoru v závislosti na teplotě.....	19
Obr. 1.7	Sériové řazení superkapacitorů pomocí laserového svaření.....	22
Obr. 1.8	Detail propojení superkapacitoru.....	22
Obr. 1.9	Průběh napětí a proudu při vybíjení.....	24
Obr. 1.10	Porovnání různých zdrojů el. Energie s ohledem na měrnou energii a výkon.....	25
Obr. 3.1	Typový výkres trolejbusu Škoda 28 Tr Solaris.....	29
Obr. 3.2	Řez asynchronního motoru.....	30
Obr. 3.3	Statorové vinutí vyvedené do konektorů.....	31
Obr. 3.4	Řez rotoru asynchronního motoru.....	31
Obr. 4.1	Navržené blokové schéma trolejbusu 28 Tr Solaris s akumulací energie...32	
Obr. 4.2	Schéma rekuperačního obvodu.....	33
Obr. 4.3	Schéma průběhu proudu při nabíjení superkapacitoru.....	35
Obr. 4.4	Schéma průběhu proudu při vypnutém tranzistoru T_1	36
Obr. 4.5	Náhradní schéma superkapacitoru.....	37
Obr. 4.6	Závislost účinnosti superkap. na napětí pro různé velikosti výkonu.....	37
Obr. 4.7	Schéma průběhu proudu při vybíjení superkapacitoru.....	38
Obr. 4.8	Schéma průběhu proudu při vypnutém tranzistoru T_2	39
Obr. 5.1	Mapa trasy Pardubice Dubina sever – Počapelské Chalupy.....	40
Obr. 5.2	Rozdělení úseků na pět částí.....	41
Obr. 5.3	Článek superkapacitoru BCAP firmy Maxwell.....	51
Obr. 5.4	Elektrochemická akumulátorová baterie NiMH Saft NHP 5-680.....	53
Obr. 5.5	Závislost kapacity NiMH baterie na počtu cyklů.....	53

Seznam příloh

Příloha č.1a – Schéma napěťového balancéru firmy Maxwell.....	60
Příloha č.1b – Popis funkce obvodu napěťového balancéru.....	61
Příloha č.2 – obvod 600V, sběrače, stykače, přebíjení, filtr.....	62
Příloha č.3 – obvod 600V, rekuperační bloky, brzdové spínače, brzdový odporník....	63
Příloha č.4 – obvod 600V, napěťový střídač, trakční motorová jednotka.....	64

Schéma napěťového balancéru firmy Maxwell



Popis funkce obvodu napět'ového balancéru

Q1 – ochrana proti přepólování

R18, R21 – dělič napětí pro nastavení řídicího obvodu

C1 s R18 – zabraňuje kmitání

U1 – komparátor, který reaguje na prahové napětí

R19 – předřadný odpor

R1 – nastavení napětí na bázi Q5

Q5 – proudová pojistka

R5 – omezující odpor

R2 – nastavení pracovního bodu Q2

R4 – omezující odpor k Q4

R8 – nastavení pracovního bodu Q4

Q4 – Darlingtonovo zapojení tranzistorů

R9, R10 – část zpětné vazby

Q7 – nastavení konstantního proudu k Q4

R7 – omezující odpor k tranzistoru Q6

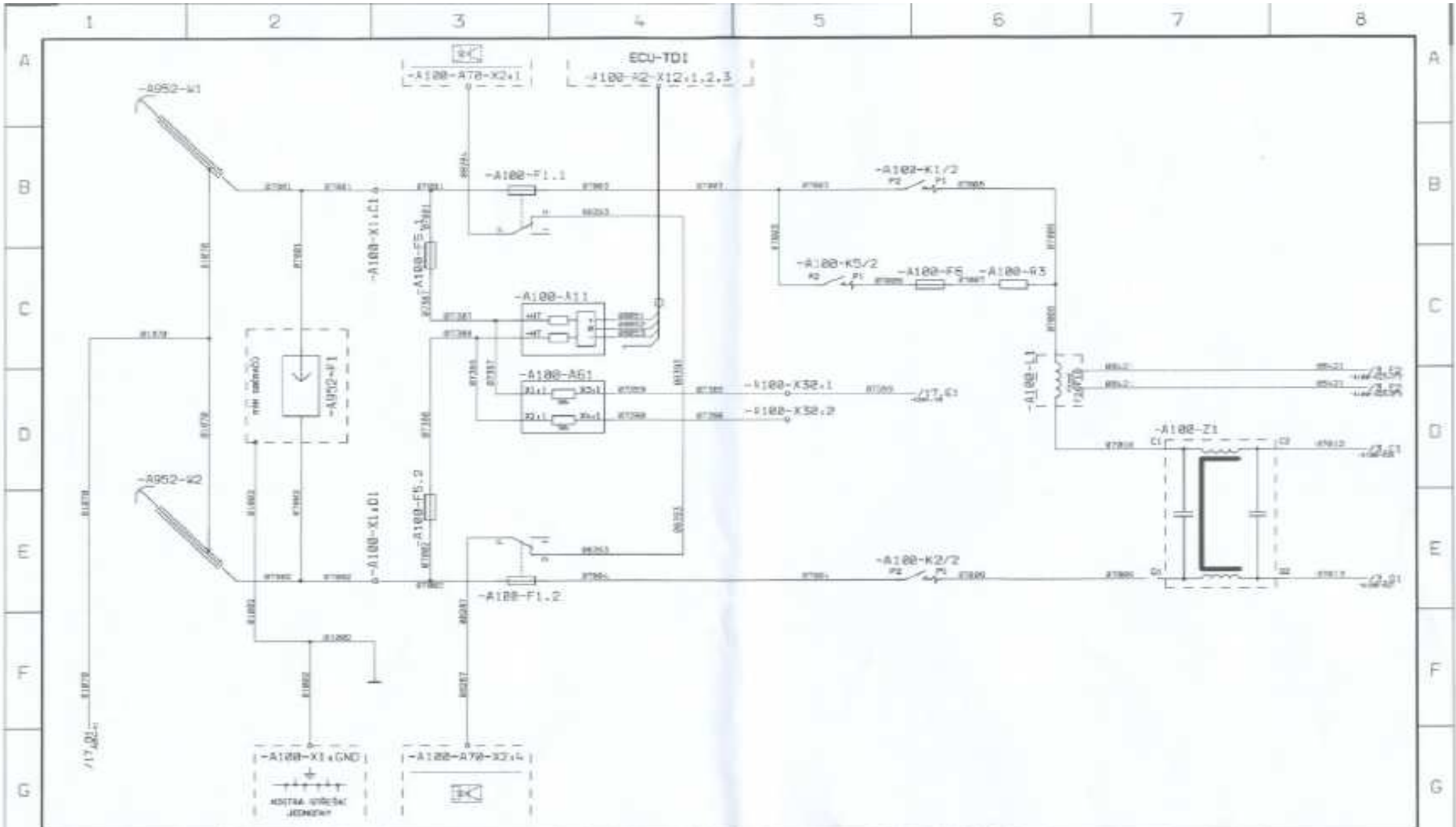
Q6 – používá se jako invertor pro zapnutí Q3

R6 – omezující odpor k tranzistoru Q3

R3 – nastavení pracovního bodu Q3

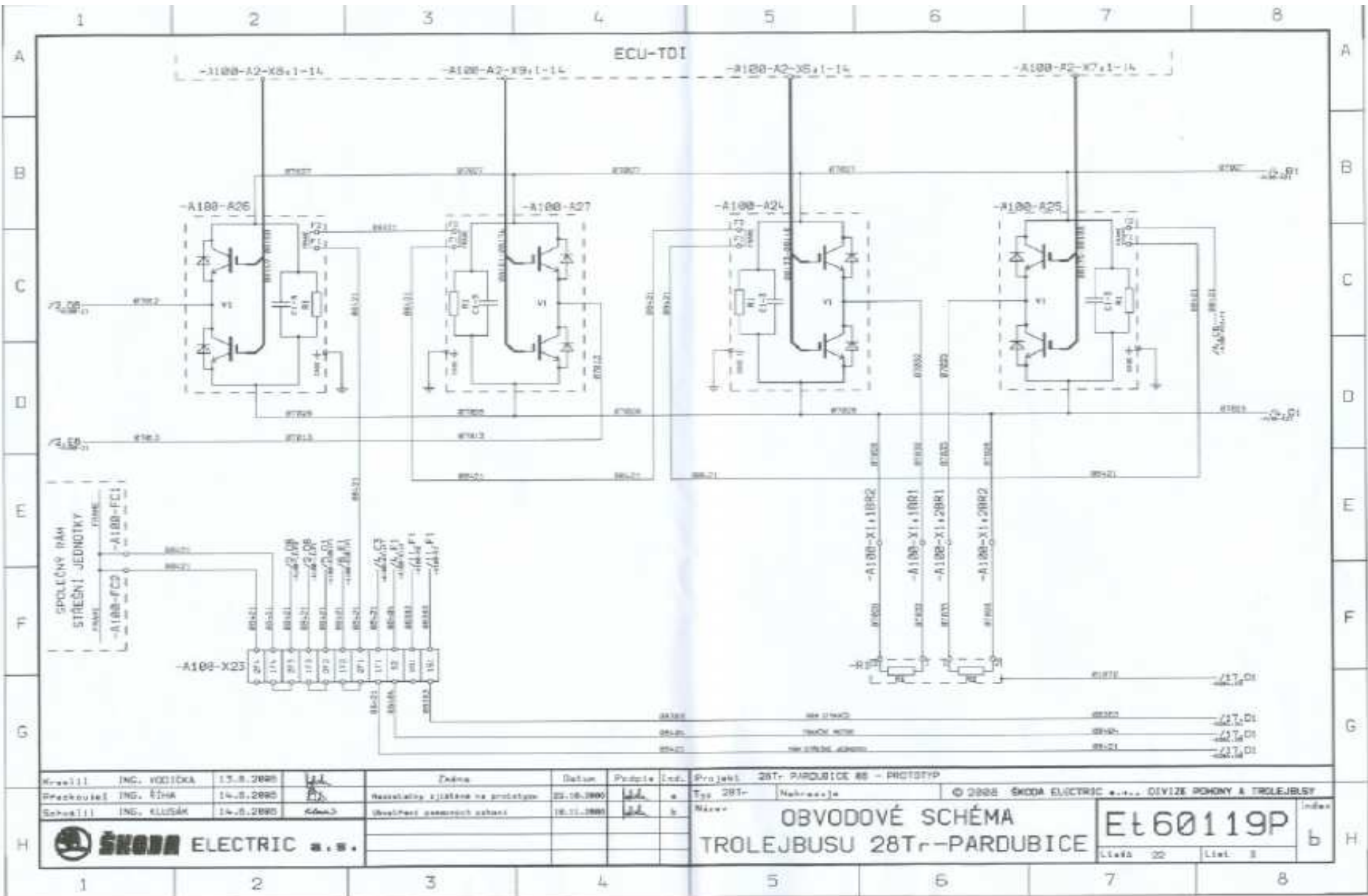
D1 – oddělovací dioda

R20, D2 – používá se pro ladění, LED se rozsvítí, když je obvod aktivní



Kraglil	ING. VOJTEHA	13.8.2000	<i>[Signature]</i>	Zemna	Delov	Podpis Ind.	Projekt	DST. PARDUBICE 88 - PROTOTYP	
Prachovak	ING. RINA	14.8.2000	<i>[Signature]</i>	Nabavky vyzivene na analize	22.10.2000	<i>[Signature]</i>	Typ 28Tr	Nabavuje	© 2000 ŠKODA ELECTRIC a.s., DIVIZE PARDUBICE A TROLEJBUSY
Schalll	ING. KLUSAK	14.8.2000	42645	Modifikace soustavy schéma	10.11.2000	<i>[Signature]</i>	Název	OBVODOVÉ SCHÉMA TROLEJBUSU 28Tr-PARDUBICE	
								E60119P	
								List 22	
								List 2	
								b	





Kreslil	ING. VOJTEKA	13.8.2008	<i>[Signature]</i>	Zámena	Datum	Podpis	Ind.	Projekt	28Tr. PARDUBICE 88 - PROTOTYP
Prerobil	ING. ŠTĚPA	14.8.2008	<i>[Signature]</i>	Nastavenie vjstávk na prototyp	25.10.2008	<i>[Signature]</i>	a	Typ	28Tr. Nehrajsko
Schválil	ING. KLUSÁK	14.8.2008	<i>[Signature]</i>	Overenie parametrov schém	18.11.2008	<i>[Signature]</i>	b	Návrh	© 2008 ŠKODA ELECTRIC s.r.o. DIVÍZE PŘEMYSL & TROLEJBUSY
OBVODOVÉ SCHÉMA TROLEJBUSU 28Tr-PARDUBICE									Et 60119P ^{index}



b

