

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Použití superkapacitorů na vozidlech MHD**

**Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Škubal, Ph.D.  
Autor: Bc. Jan Jeníček**

**2014**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan JENÍČEK**  
Osobní číslo: **E12N0089P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Použití superkapacitorů na vozidlech MHD**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

V souvislosti s úsporami energie se na trakční vozidla začínají zavádět nové akumulátory elektrické energie - superkapacitory. Cílem práce je provést analýzu možnosti použití těchto zařízení na vozidlech MHD, srovnání úspor energie s úsporami při rekuperaci a navrhnout měření a vyhodnocení energetických vlastností takového vozidla.

1. Důvod a způsob použití superkapacitorů na vozidle.
2. Porovnání vůči jiným metodám úspory energie na vozidlech MHD.
3. Přínos superkapacitorů v souvislosti se spotřebou energie a dynamikou jízdy vozidla.
4. Měření na vozidle vybaveném superkapacitory.
5. Vyhodnocení výsledků, rozbor přínosu.

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

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: **Ing. Jaroslav Škubal, Ph.D.**  
ŠKODA Transportation, Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá otázkou nasazení superkapacitorů na vozidlech MHD a zjištění přínosu superkapacitorů v souvislosti se spotřebou elektrické energie a dynamikou jízdy vozidla. V první části práce je uvedena historie superkapacitorů, následně fyzikální principy, vlastnosti, přehled možného využití, zásady při měření, jejich výhody a nevýhody. V druhé části je podrobně popsán trolejbus AVANCITY<sup>+</sup> SF 18 m, na kterém probíhalo měření přínosu superkapacitorů a následné vyhodnocení dat naměřených na tomto trolejbusu. Naměřená data, které jsem zpracovával v rámci diplomové práce, byla poskytnuta firmou ŠKODA TRANSPORTATION a.s.

## Klíčová slova

Superkapacitor, pseudokapacitor, elektrická dvojvrstva, avancity<sup>+</sup> SF 18m, energetická bilance, dynamika jízdy, měření rozjezdu

počet stran	počet příloh	počet obrázků	počet tabulek
62	0	21	10

## Abstract

This diploma thesis deals with the using of supercapacitors on public transport vehicles and determine the contribution of supercapacitors in related with the consumption of electric energy and dynamics of the vehicle. In the first part of a diploma is supercapacitor's history, followed by physical principles, characteristics, an overview of potential applications, the measurement principles and their advantages and disadvantages. In the second part is closely described trolley bus AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m. The contribution of supercapacitors and consequential evaluate of the measured data were measured on this trolley bus.

The measured data which I was working on for the diploma usage were provided by ŠKODA TRANSPORTATION a.s.

## Key words

Supercapacitor, pseudocapacitor, Electrochemic double layer capacitor, avancity<sup>+</sup> SF 18m, energy balance, driving dynamics, measurement of start

number of pages	number of appendixes	number of pictures	number of tables
62	0	21	10

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu, který je součástí diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 15. 3. 2014

.....

Bc. Jan Jeníček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavovi Škubalovi, Ph.D. a konzultantům Ing. Jiřímu Ceplochovi a Ing. Jiřímu Štědrému za odborné vedení, cenné rady, připomínky a vstřícné jednání při tvorbě mé diplomové práce.

Poděkování také patří vedoucímu oddělení projektů výkonová elektronika a pohony ze ŠKODA ELECTRIC a.s. doc. Dr. Ing. Jiřímu Flajtingrovi za odborné rady a konzultace.

## Obsah

1.	Úvod .....	- 10 -
1.1.	Seznam použitých zkratk .....	- 10 -
2.	Superkapacity.....	- 12 -
2.1.	Historie .....	- 12 -
2.2.	Princip.....	- 12 -
2.3.	Pseudokapacity .....	- 14 -
2.4.	Spojování superkapacitorů .....	- 14 -
2.5.	Sériové spojení superkapacitorů .....	- 15 -
2.6.	Aktivní balancování .....	- 15 -
2.7.	Pasivní balancování .....	- 15 -
2.8.	Zásady pro spojování superkapacitorů.....	- 17 -
2.9.	Vliv vlhkosti.....	- 18 -
2.10.	Vliv tlaku .....	- 18 -
2.11.	Polarita superkapacitoru .....	- 18 -
2.12.	Počet cyklů.....	- 19 -
2.13.	Efektivita a životnost superkapacitoru .....	- 19 -
2.14.	Vliv superkapacitorů na životní prostředí .....	- 20 -
2.15.	Možnosti využití superkapacitorů .....	- 20 -
2.16.	Výhody superkapacitorů.....	- 22 -
2.17.	Nevýhody superkapacitorů .....	- 23 -
2.18.	Specifikace .....	- 24 -
2.19.	Vlastnosti a použití v dopravní technice.....	- 25 -
2.20.	Alternativy pro použití v trolejbusové dopravě.....	- 26 -
3.	Možné způsoby akumulace elektrické energie .....	- 27 -
3.1.	Rozdělení chemických zdrojů .....	- 27 -
3.1.1.	Primární články .....	- 27 -
3.1.2.	Sekundární články.....	- 27 -
3.1.3.	Palivové články .....	- 27 -
3.1.4.	Olověné akumulátory .....	- 27 -
3.1.5.	Akumulátory nikl-kadmiové .....	- 28 -
3.1.6.	Akumulátory nikl – metalhydridové .....	- 28 -
3.1.7.	Akumulátory Li-ion .....	- 29 -



## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

3.1.8.	Akumulátory sodík – nikl chloridové .....	- 30 -
3.2.	Porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie.....	- 31 -
4.	Zpracování dat a zhodnocení energetických přínosů superkapacitorů.....	- 32 -
4.1.	Trolejbus AVANCITY <sup>+</sup> SF 18m.....	- 32 -
4.1.1.	Základní parametry.....	- 32 -
4.1.2.	Systém akumulace energie.....	- 34 -
4.1.3.	Regulace měniče superkapacitorů .....	- 35 -
4.1.4.	Dynamika jízdy.....	- 35 -
4.2.	Měření na trolejbusu AVANCITY <sup>+</sup> SF 18m.....	- 37 -
4.2.1.	Požadované parametry zkoušky jízdních vlastností .....	- 37 -
4.3.	Zkouška rozjezdu, elektrodynamického brzdění a rychlosti .....	- 38 -
4.3.1.	Blokové schéma měření .....	- 39 -
4.3.2.	Popis blokového schématu měření .....	- 40 -
4.3.3.	Obvodové schéma zapojení trolejbusu .....	- 40 -
4.3.4.	Energetická bilance vozidla .....	- 42 -
4.3.5.	Vzorce použité při vyhodnocování naměřených dat.....	- 42 -
4.3.6.	Grafy - ložený trolejbus .....	- 46 -
4.3.7.	Výsledky měření - ložený trolejbus.....	- 48 -
4.3.8.	Grafy - prázdný trolejbus.....	- 54 -
4.3.9.	Výsledky měření - prázdný trolejbus.....	- 56 -
4.3.10.	Shrnutí energetické bilance vozidla se superkapacitory .....	- 58 -
5.	Závěr.....	- 59 -
6.	Seznam použité literatury .....	- 60 -
7.	Evidenční list.....	- 62 -

# 1. Úvod

V posledních letech se v rámci snižování nákladů na dopravu stále častěji využívá možnosti rekuperace elektrické energie, tedy výroby elektrické energie, pokud je elektrický pohon v režimu generátoru. Pokud není v blízkosti vozidla, které rekuperuje, jiné vozidlo, které spotřebuje vzniklou energii, je nutné vyrobenou energii zmařit v brzdovém odporníku nebo využít hospodárnější cesty, a tou je uložení do akumulátorů. Superkapacitor jako akumulátor má výhodu oproti klasickým bateriím. Dokáže rychle reagovat, rychleji se nabíjí a má větší teplotní rozsah pro správnou funkčnost. Cílem této diplomové práce je zhodnotit přínos superkapacitorů jako akumulátoru elektrické energie a následného zdroje energie pro rozjezd trolejbusu. Vyhodnocení naměřených dat má poukázat zejména na množství energie, které se naakumuluje do superkapacitorů, a následně poukázat, jaká část se použije pro rozjezd a kolik energie spotřebují pomocné pohony.

## 1.1. Seznam použitých zkratk

SC	superkapacitor
EDLC	elektrický dvojvrstvý kondenzátor
$C_{dl}$	kapacita elektrické dvojvrstvy [F]
t	čas [s]
$U_{tr}$	trolejové napětí [V]
$I_{tr}$	proud troleje [A]
$U_{mez}$	napětí meziobvodu [V]
$I_{pp}$	proud pomocných pohonů [A]
$I_{top}$	proud topení [A]
$U_{cap1}$	napětí první větve superkapacitorů [V]
$U_{cap2}$	napětí druhé větve superkapacitorů [V]

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

$I_{cap1}$	proud první větve superkapacitorů [A]
$I_{cap2}$	proud druhé větve superkapacitorů [A]
$P_{tr}$	výkon z troleje [kW]
$P_{pp}$	výkon pomocných pohonů [kW]
$P_{top}$	výkon topení [kW]
$P_{cap1}$	výkon první větve superkapacitorů [kW]
$P_{cap2}$	výkon druhé větve superkapacitorů [kW]
$E_{tr}$	energie troleje [kJ]
$E_{pp}$	energie pomocných pohonů [kJ]
$E_{top}$	energie topení [kJ]
$E_{cap1}$	energie první větve superkapacitorů [kJ]
$E_{cap2}$	energie druhé větve superkapacitorů [kJ]
$E_{bez\_sc}$	energie bez superkapacitorů [kJ]
V	volt, jednotka napětí
A	ampér, jednotka proudu
F	farad, jednotka kapacity
kW	kilowat, jednotka výkonu
kJ	kilojoule, jednotka energie
H	henry, jednotka indukčnosti
Hz	hertz, jednotka frekvence
$\Omega$	ohm, jednotka elektrického odporu
s	sekunda, jednotka času
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsiův, jednotka tepla

## 2. Superkapacitory

### 2.1. Historie

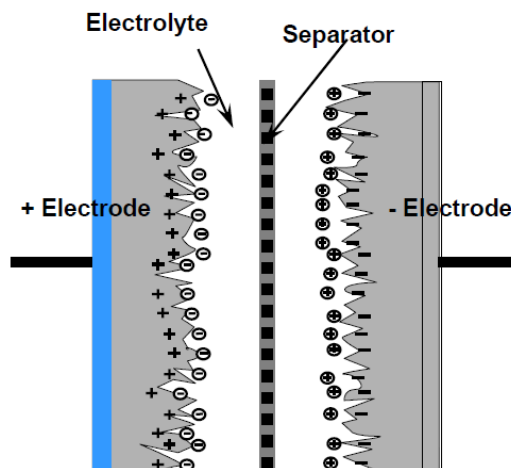
Počátek vzniku kondenzátorů je datován do roku 1837, kdy významný anglický fyzik a chemik Michael Faraday objevil polarizaci dielektrika. Zjistil, že pokud se dielektrikem vyplní prostor mezi elektrodami kondenzátoru namísto vzduchu, vzroste tím jeho kapacita. Princip uchování energie v superkapacitoru vychází z efektu, který popsal již v roce 1856 K. Hemholz, který objevil princip ukládání elektrického náboje založený na jeho separaci a tím i elektrickou dvojrstvou. Tento typ superkapacitoru bývá označován jako EDLC (Electrochemic double layer capacitor). Taktéž je v některé literatuře tento typ superkapacitoru nazýván jako elektrochemický dvojrstvý kondenzátor. [8, 9]

První praktické využití EDLC se datuje k roku 1957, kdy si společnost General Electric nechala patentovat kondenzátor s „výjimečně“ vysokou kapacitou.

V roce 1966 a 1970 byly patentovány další principy superkapacitorů firmou SOHIO, ale tyto SC nemohly být nasazeny pro praktické využití kvůli svým parametrům. Rok 1971 přinesl první komerčně použitelný SC. Byl navržen firmou NEC pro zálohování pamětí. Nevýhodou tohoto SC byl vysoký vnitřní odpor. V roce 1982 se začínají objevovat kov-oxid elektrody pro zlepšení parametrů. Roku 1992 přebírá vývojový program firma Maxwell. [2]

### 2.2. Princip

Stejně jako u běžného kondenzátoru je energie uchovávána v elektrostatickém poli. Po přivedení vnějšího napětí se kladné ionty přesouvají k záporné elektrodě a záporné ionty ke kladné elektrodě. Tak vznikají dvě vrstvy, na nichž se skladuje elektrický náboj, viz Obr 1. Kapacita superkapacitoru může dosahovat až tisíců faradů. [3]



Obr. 1: Struktura superkapacitoru [3]

Přestože se jedná o elektrochemické zařízení, neprobíhají v superkapacitoru žádné chemické reakce. Využitím elektrostatického vázání energie je docíleno, že proces nabíjení a vybíjení je velice rychlý v porovnání například s klasickými bateriemi. Zároveň je možné opakovat tyto procesy až milionkrát. Supercapacitor se jeví jako dva do série zapojené kondenzátory oddělené separátorem (oddělovačem). Kapacita elektrické dvojvrstvy je dána vztahem:

$$C_{dl} = \frac{\varepsilon A}{4\pi t} \quad (1)$$

kde  $\varepsilon$  je permitivita prostředí,

$A$  je povrch elektrody,

$t$  je tloušťka dvojvrstvy.

Kapacita SC je přímo úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti. Materiálem vhodným pro elektrody je práškový aktivní uhlík z důvodu velké dosažitelnosti plochy skutečného povrchu (vysoká poréznost), elektrické vodivosti, chemické netečnosti, vysoké teplotní stability, odolnosti proti korozi a relativně nízké ceně. Díky tomu lze dosáhnout povrchu elektrody až kolem  $3000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  (aktivní plocha se může ještě zvětšit použitím nanomateriálů). Tloušťka elektrické dvojvrstvy se pohybuje kolem 10 nm. Vzdálenost uhlíkových zrnků zároveň omezuje provozní napětí superkapacitoru na hodnotu cca 2,5V. Díky těmto vlastnostem lze vyrobit superkapacitor s kapacitou v řádu tisíců Faradů. [10]

### **2.3. Pseudokapacitory**

Princip pseudokondenzátorů je odlišný od EDLC. Na rozdíl od EDLC je princip založen na chemických reakcích, které probíhají na povrchu elektrody. Jedná se o mladou technologii, která může být v budoucnu dobře rozvíjena. Pseudokapacitor pracuje stejně jako superkapacitor s EDLC. Hlavní rozdíl je v použití materiálu na elektrody. Často bývá první elektroda tvořena uhlíkovými sazemí a druhá elektroda bývá z oxidu kovů. Z toho vyplývá, že pseudokapacitor může dosahovat větší hustoty energie (až o 80 % více) než superkapacitor s EDLC.

Největším problémem pseudokapacitorů je výroba nízkonákladového oxidu kovu o vysokém výkonu. Další nevýhodou kromě kratší životnosti je nižší účinnost nabíjení a delší časová odezva. [11]

### **2.4. Spojování superkapacitorů**

Spojování superkapacitorů má skoro stejné zásady, jako propojování všech zdrojů velkých proudů. Je tedy nutné zajistit malý elektrický odpor všech vodivých spojení a dobrou mechanickou pevnost spojů, která odolá mechanickým otřesům a popřípadě i tepelné roztažnosti. [1]

Pro spojení superkapacitorů lze použít několik metod. Nejpoužívanější metodou je propojení pomocí vodivých pásků (bus bar). Výhodou tohoto spojení je snadnost a následná rozmontovatelnost spojení. Nevýhodou je poměrně velký nárůst odporu a možnost nechtěného povolení spoje. Pro co nejmenší odpor, který vzniká spojením superkapacitorů, se používá svařování nebo pájení. V obou případech se jedná o nerozebíratelný spoj, a proto je vhodné použít tyto druhy spojování v aplikacích, kde nebude požadováno rozebírání modulu se superkapacitory. [3]

## 2.5. Sériové spojení superkapacitorů

Jak již bylo zmíněno, nevýhodou superkapacitoru je nízké jmenovité napětí, pohybující se okolo 2.5V. Tato velikost napětí je nedostatečná pro většinu aplikací, a proto je nutné spojovat superkapacity do série, abychom dosáhli požadovaného napětí. Protože každý superkapacitor má malou toleranci kapacity a odporu, je nutné vybalancovat každý superkapacitor, aby nebyla překročena jeho jmenovitá hodnota napětí. [3]

## 2.6. Aktivní balancování

Podle aktuální situace vyrovnává napětí na jednom, nebo mezi dvěma sousedními prvky (jedná se o komparátor s přesnou referencí, který v případě nutnosti připíná vybíjecí odpor na svorky kapacitoru). Toto řešení je nutné použít v aplikacích, kde dochází k rychlému střídání nabíjecích a vybíjecích cyklů, např. pohon vozidla. [4]

## 2.7. Pasivní balancování

Nejčastější způsob pasivního balancování je založen na použití rezistoru. Koncept odporového vyvážení využívá rezistor připojený paralelně k superkapacitoru. [3]

Velikost tohoto odporu závisí na svodovém proudu kapacitoru a na požadované rychlosti vyrovnání napětí (tato doba se může pohybovat v řádech hodin či dnů). Tento způsob se používá v aplikacích s nízkou dynamikou výměny elektrické energie, např. vědeckotechnický, u záložních zdrojů. Nevýhodou tohoto řešení jsou zvýšené ztráty a snížená účinnost. [4]

Určení správného počtu superkapacitorů je závislé na zamýšlené aplikaci. Každá aplikace má různé faktory, podle kterých se musíme řídit. Za nejdůležitější faktory považujeme: maximální a minimální napětí, velikost průměrného proudu nebo výkonu, velikost proudových nebo výkonových špiček a v neposlední řadě teplota. Všechny tyto faktory musíme zohlednit při navrhování modulu se superkapacity.

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

Pro sériové spojení platí následující vztah:

$$\text{Počet SC} = \frac{U_{max}}{U_r} \quad [-] \quad (2)$$

kde:  $U_{max}$ .....maximální požadované napětí pro danou aplikaci  
 $U_r$ .....jmenovité napětí SC

Pro paralelní spojení platí následující vztah:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

V praxi je nutné jednotlivé superkapacitory sério-paralelně spojovat do tzv. kondenzátorových baterií, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů. [4]



## 2.8. Zásady pro spojování superkapacitorů

Při spojování superkapacitorů je třeba dodržovat tyto zásady [9]:

- Nízký odpor spojů: Povrch spojovaných dílů musí být čistý, šroubové spoje utaženy, kontaktní plocha by měla být co největší.
- Ošetření povrchu spojů: Oxidace má vliv na odpor spojů, proto by spoje měly být ošetřeny elektrickou vodivou pastou.
- Tepelná roztažnost: Při spojení materiálu s různou tepelnou roztažností může dojít k povolení spojů, a tudíž může dojít k následnému zvětšování elektrického odporu, zvětšení ohřívání a tím ke zhoršení parametrů superkapacitoru.
- Plocha propojovacích vodičů: plocha propojovacích vodičů musí být navržena na největší očekávané proudy s koeficientem bezpečnosti 1,5. Takto jsou spoje dimenzovány i proti případnému zkratu.
- Elektrická izolace: přídatná izolace mezi superkapacitory. Materiál a tloušťka musí být navržen s ohledem na pracovní napětí superkapacitorů.
- Galvanická koroze spojů: pro spojování superkapacitorů se doporučuje zvolit materiál s co nejmenší galvanickou aktivitou proti hliníku, jelikož dochází ke korozi vlivem různých elektrochemických potenciálů obou materiálů.
- Mechanické namáhání: spoje a celá konstrukce musí být navržena tak, aby dokázala minimalizovat případné mechanické namáhání od různých nárazů a chvění nebo aby se zabránilo poškození izolace.
- Tepelná ochrana: správná teplota pro obvyklou funkčnost superkapacitoru by se měla pohybovat v rozmezí  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $60^{\circ}\text{C}$ , proto je nutné v některých případech přidat chladicí zařízení, které bude odvádět teplo do okolí. Používáním superkapacitorů při nižších teplotách se dosáhne delší životnosti. Provozní teplota by však neměla

klesnout pod  $-40^{\circ}\text{C}$ . Jinak dochází k mrznutí elektrolytu. Superkapacitor, který není používán, by taktéž neměl být vystaven teplotám mimo rámec používání.

### **2.9. Vliv vlhkosti**

Superkapacitor je schopen fungovat i při velké vlhkosti. Musíme ovšem zabezpečit, že nedojde během jeho činnosti ke kondenzaci par. Superkapacity se během skladování běžně zavírají do vakuových kontejnerů. Důsledkem toho je, že se na kontaktech superkapacitoru nevytváří koroze. Případná koroze, která je způsobena vysokou vlhkostí, se dá odstranit lehkým zbrúšením, např. smirkovým papírem. [3]

### **2.10. Vliv tlaku**

Pokud je superkapacitor vystaven mírnému podtlaku, nejedná se o problém, protože nedochází k žádným negativním účinkům na funkci superkapacitoru. Tlak vyšší než atmosférický se ovšem projevuje negativními účinky, a to v podobě deformace nanostruktur u elektrod. V některých případech mohou být poničeny superkapacity jako celek. [3]

### **2.11. Polarita superkapacitoru**

Jak již bylo zmíněno, obě elektrody superkapacitorů jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Svorky jsou tudíž v jistém ohledu zaměnitelné. Každý výrobce už při výrobě rozliší polaritu svorek, proto by se měl brát ohled na polarizaci, kterou vyznačil výrobce. Po přepólování superkapacitoru nedochází k jeho zničení nebo dokonce výbuchu. Výkon a životnost superkapacitoru se ale snižuje. [3]

## 2.12. Počet cyklů

Každým nabíjecím a vybíjecím cyklem dochází k opotřebování superkapacitoru. Velikost degradace je přímo závislá na velikosti jmenovitého napětí. Při nižším jmenovitém napětí je degradace kapacity podstatně menší. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů je u běžných superkapacitorů kolem jednoho milionu. [3]

## 2.13. Efektivita a životnost superkapacitoru

Efektivita ukládání energie do superkapacitoru a efektivita znovu využívané energie závisejí podstatnou měrou na účinnosti přenosu výkonu mezi bodem odběru a zdrojem přebytečné energie a superkapacitorem. Především se jedná o účinnost zvyšovacího nebo snižovacího měniče, který je obvykle přítomen, a ke kterému je připojen superkapacitor. Dále jsou to ohmické ztráty v přenosu elektrické energie. Účinnost samotného superkapacitoru je velmi vysoká (až 98 %).

Životnost superkapacitoru je v porovnání s akumulátory daleko vyšší. Výrobci uvádějí až 1 milion nabíjecích/vybíjecích cyklů, přičemž i po dosažení tohoto limitu je superkapacitor stále schopen funkce, ovšem se zhoršenými vlastnostmi (snížená kapacita, zvýšený vnitřní ekvivalentní sériový odpor ESR). Vlivem cyklického nabíjení a vybíjení se snižuje kapacita a zvyšuje ESR. Konec životnosti je definován pro pokles jmenovité kapacity o 20 % nebo zvýšení ESR o 100 %. Dalším faktorem, který ovlivňuje kapacitu a ESR superkapacitoru, je teplota a provozní napětí. Udávaná životnost (až 10 let) platí pro teplotu superkapacitoru 25 °C. Každým dalším zvýšením teploty o 10 °C se životnost snižuje na polovinu! Např. při trvalém provozu s teplotou 65 °C je životnost necelý 1 rok! Taktéž při provozu na vyšším napětí než jmenovitém dochází k rapidnímu snížení kapacity a tedy životnosti. [4]

## 2.14. Vliv superkapacitorů na životní prostředí

Používáním superkapacitorů nehrozí žádné nebezpečí z pohledu na životní prostředí, jelikož svým fungováním negeneruje žádné škodlivé látky. Po skončení své životnosti je superkapacitor likvidován stejným způsobem jako například akumulátory, které se likvidují jako nebezpečný odpad. Obalové materiály jsou snadno recyklovatelné. Zbylé části superkapacitorů se likvidují spalováním při vysokých teplotách. [3]

## 2.15. Možnosti využití superkapacitorů

Superkapacitory jsou kvůli svým parametrům stále častěji využívány v různých aplikacích, kde je potřeba skladovat energii. V dnešní době je důležitá i otázka neznečišťování životního prostředí. Díky využívání superkapacitorů je snížena produkce emisí a škodlivých látek v oblasti pohonů. Vyčerpávání přírodních zdrojů, zejména pak ropy, nutí lidstvo hledat alternativní zdroje, které by se daly používat. U železničních vozidel, tramvají, trolejbusů, vozidel podzemní dráhy, ale i např. autobusů městské hromadné dopravy se použití hybridních pohonů s využitím superkapacitorů velmi osvědčilo. Superkapacitory umožňují elektromobilům a hybridním pohonům šetřit palivo a snížit produkci emisí. [13]

Superkapacitory se v současné době využívají jako:

1. **Autobaterie:** Využitím několika SC lze sestavit náhradní modul, který by fungoval jako autobaterie. Výhod je několik. Rozměr a hmotnost alternativní autobaterie ze SC je podstatně menší. Další výhodou je schopnost dodat okamžitě maximální výkon a teplotní stálost kapacity. V současnosti se stavějí 12 V moduly, ale v budoucnu se počítá i s 36 – 42 V autobateriemi. Superkapacitory s mimořádně vysokou hustotou výkonu jsou schopné nastartovat automobil i při velmi nízkých teplotách. Zaručují rychlý, spolehlivý start bez ohledu na teplotu okolí nebo jiné elektrické požadavky. Ani stáří baterie nemá vliv na funkčnost. [14]

**2. Univerzální záložní napájení:** použití superkapacitorů jako záložního zdroje pro případ výpadku energie v oblastech, kde je potřeba nepřetržitého napájení (záložní osvětlení, servery, atd.) [15]

**3. Použití v hybridních vozidlech:** V dnešní době je rozvoj hybridních vozidel velmi lukrativní oblastí pro vývoj. Hybridní vozidlo si vyrobí energii pomocí motorgenerátoru nebo palivového článku. Vyrobená energie je spotřebovávána trakčním motorem. Superkapacitor zastává funkci akumulátoru pro nadbytečnou energii, která vzniká při brzdění. [14]

**4. Použití ve stejnosměrné síti:** Nejčastější použití SC je při akumulaci elektrické energie, kdy se energie nahromadí v SC a následně využije při rozběhu motoru. Úspora energie při brzdění je mezi 20 – 40 %. [16]

**5. Použití ve střídavé síti:** SC snižuje množství energie vyměněné mezi spotřebičem a zdrojem. Lze tím zajistit plynulý provoz bez oscilací. [17]

**6. Použití ve větrných elektrárnách:** SC slouží jako záložní zdroj pro nastavení lopatek větrné elektrárny a tudíž přispívá k maximalizování zisku vyrobené energie. Větrné elektrárny mají nastavitelné lopatky, které jsou natáčeny tak, aby mohl být využit maximální potenciál větru. [18]

## 2.16. Výhody superkapacitorů

- Velmi vysoká účinnost nabíjení a vybíjení. V [19] se uvádí 88-98 % oproti olověnému akumulátoru, který má účinnost maximálně 85%. Palivové články dosahují účinnosti kolem 30-40 %.
- Malý vnitřní odpor (řádově mΩ). Díky tak malému odporu se superkapacitor velice rychle nabíjí a vybíjí. Rychlost nabíjení byla ověřena i měřením.
- Oproti akumulátorům mají superkapacitory 10x vyšší měrný výkon na jednotku hmotnosti.
- Správná funkce SC je zaručena při velkém teplotním rozsahu (-40 °C až 65 °C). Horní hranice se udává v rozmezí 65 °C až 85 °C.
- U superkapacitorů nedochází k paměťovému efektu.
- Bezproblémová údržba. Nejsou potřeba žádné speciální ohledy při přepravě.
- Životnost SC je dána počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů při teplotě 25 °C. Životnost superkapacitorů od firmy MAXWELL dosahuje až 1 000 000 cyklů. Po každém cyklu dochází k nenávratné ztrátě kapacity a nárůstu sériového odporu. Udává se, že životnost superkapacitorů je dokud se sériový odpor nezdvójnasobí nebo dokud nepoklesne kapacita pod 80% jmenovité hodnoty. [1]

## 2.17. Nevýhody superkapacitorů

- Zdraví škodlivá výroba, jelikož při výrobě uhlíkových nanotrubic se uvolňují toxické a rakovinotvorné zplodiny. Tyto nanouhlíky jsou nebezpečné i z důvodu malých rozměrů (1 až 100 nm). Mohou se proto dostat do plic.
- Superkapacitory mají 10x nižší hustotu energie na jednotku hmotnosti oproti bateriím.
- Nebezpečná likvidace.
- Nežádoucí vlastností superkapacitoru je samovybíjení. Důležitým aspektem je přítom teplota, s růstem pracovních teplot roste i rychlost samovybíjení.
- Vysoká cena, ale v posledních letech se superkapacitory velice rozšiřují a tak se dá očekávat pokles ceny.
- Samostatný superkapacitor má nízké provozní napětí, které je ovlivněno vzdáleností elektrod. Hodnota je 2,5 V. Při nedodržení tohoto napětí může dojít ke snížení životnosti. Pro větší napětí se používá sériová kombinace. [1]

## 2.18. Specifikace

Jako každá součástka, tak i superkapacitory mají vlastní katalogový list, ve kterém jsou uvedeny parametry charakterizující jednotlivý druh superkapacitorů. Datasheet obsahuje hodnoty parametrů, za které ručí výrobce. Dále je zde možné najít i různé metody měření, popřípadě typické aplikace. [3]

Popis parametrů superkapacitoru:

Kapacita: elektrický náboj uložený na daném elektrickém potenciálu

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5)$$

Napětí: maximální provozní napětí pro jeden článek. Jmenovité napětí je závislé na teplotě.

Vnitřní odpor: jedná se o odpor zahrnující všechny druhotné odpory, jako jsou nedokonalost výrobního procesu, materiálu atd. Je to jeden ze dvou hlavních parametrů indikujících životnost superkapacitoru. Po překročení dvojnásobné hodnoty tohoto odporu dochází ke zhoršení parametrů superkapacitoru.

Svodový proud: stabilní parazitní proud, který vybíjí superkapacitor i v okamžiku jeho nevyužívání.

Teplotní rozpětí: udává rozsah teplot, při kterých může být superkapacitor provozován, aniž by se zhoršily jeho parametry.

Životnost: dokud kapacita nepoklesne pod 80 % nebo dokud se vnitřní odpor nezdvoujnásobí.

Počet cyklů: v rozmezí 500 k až 1 M cyklů (při splnění podmínek použití udávaného výrobcem). [3]



## 2.19. Vlastnosti a použití v dopravní technice

V dnešní době je možné uložení elektrické energie do akumulátorů, kondenzátorů a superkapacitorů. Superkapacitor lze díky svým vlastnostem zařadit mezi akumulátor a běžný elektrolytický kondenzátor. V porovnání se standardním elektrolytickým kondenzátorem dosahuje vysoké energetické hustoty (jednotky Wh/kg) a v porovnání s akumulátory má vyšší měrný výkon (jednotky až desítky kW/kg). Výraznou nevýhodou je několikrát nižší energetická hustota. Tabulka níže zobrazuje porovnání vybraných vlastností vybraných zásobníků elektrické energie. [4]

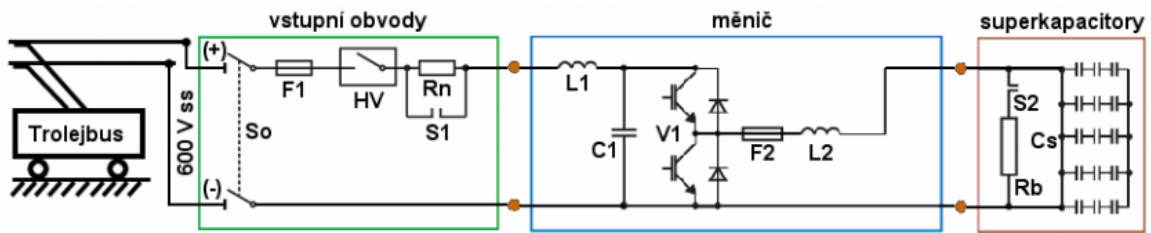
	Olověný akumulátor	Superkapacitor	Elektrolytický kondenzátor
nabíjecí doba	1 až 6 h	0,3 až 30 s	$10^{-3}$ až $10^{-6}$ s
vybíjecí doba	0,3 až 3 h	0,3 až 30 s	$10^{-3}$ až $10^{-6}$ s
energetická hustota [Wh/kg]	10 až 100	1 až 10	< 0,1
výkonová hustota [W/kg]	< 1 000	< 10 000	< 100 000
počet cyklů	1 000	> 500 000	> 500 000
účinnost	0,7 až 0,85	0,85 až 0,98	> 0,95

Tabulka 1: Porovnání akumulátorů el. energie

Superkapacitor díky svému principu ukládání energie dokáže uložit energii podstatně rychleji než akumulátor, ve kterém probíhá elektrochemická přeměna. Také vnitřní odpor superkapacitoru je menší než vnitřní odpor akumulátoru. Proto je superkapacitor vhodný pro krátkodobé uložení elektrické energie. Těchto nabízených vlastností je možno aplikačně využít právě v oblasti energetiky dopravy, kde dochází k předávání energie mezi vozidlem a vedením. Moderní vozidla elektrické trakce dokáží díky rekuperaci 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 energie ihned spotřebovávána v jiném vozidle. Kromě vozidel MHD je tato podmínka často obtížně splnitelná a kinetická energie se musí mařit v brzdových odporácích či mechanických brzdách. Zde je velice výhodné využití akumulace elektrické energie do superkapacitorů. Myšlenka použití superkapacitorů v napájení stejnosměrného systému (tramvaje, trolejbusy, železniční vozidla stejnosměrné

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

trakce) je znázorněna na Obr. 2. Energie uložená v superkapacitoru se dodá v okamžiku velkého odběru (rozjezdu). [4]



Obr. 2: Použití superkapacitorů v napájení stejnosměrného systému [4]

### 2.20. Alternativy pro použití v trolejbusové dopravě

- Závislé vozidlo s pevnými napájecími body na zastávkách - vozidlo s elektrickým pohonem naakumuluje potřebnou energii do superkapacitoru (spojení na energetický zdroj kontaktním spojením) a prostřednictvím regulační výkonové elektroniky tuto naakumulovanou energii spotřebovává při jízdě. [4]
- Polozávislé vozidlo - jednalo by se o obsluhu koncových nezatrolejovaných úseků, kde si vozidlo během jízdy z troleje naakumuluje potřebnou energii na požadovaný akční rádius. [4]

## 3. Možné způsoby akumulace elektrické energie

- Akumulace pomocí
- a) elektrostatického pole
  - b) setrvačnicku
  - c) elektrochemické přeměny

### 3.1. Rozdělení chemických zdrojů

#### 3.1.1. Primární články

Jedná se o články, které se po svém vybití nemohou dalším nabíjením dobít. Tyto články se hovorově nazývají baterie a jsou pouze na jedno použití. [7]

#### 3.1.2. Sekundární články

Na rozdíl od primárních článků jsou sekundární články schopny přivedením vnějšího proudu přijmout elektrony a tím se dobít. Elektrická energie, používaná k nabití, se v článku akumuluje ve formě chemické energie. [7]

#### 3.1.3. Palivové články

Název vychází z vlastnosti, že v těchto člancích dochází k tzv. studenému spalování paliva za tvorby elektrického proudu. Pro správnou funkci musí být splněny dvě podmínky. Palivo i kysličovadlo jsou kontinuálně a přitom odděleně přiváděny k elektrodám a reakční zplodiny jsou stejným způsobem z článku odváděny. Palivem může být vodík, formaldehyd, amoniak, zemní plyn atd. [7]

#### 3.1.4. Olověné akumulátory

Jde o nejpoužívanější sekundární elektrochemický zdroj proudu. Výhodou je dobře zvládnutá technologie výroby, nízká cena, spolehlivost, účinnost a dostatečný výkon.

Elektrolytem je vodou ředěná kyselina sírová, která disociuje na síranové ionty se záporným elektrickým nábojem a vodíkové ionty s kladným elektrickým nábojem. Aktivní hmotou záporné elektrody je porézní olovo. Ta při vybíjení uvolňuje elektrony. Aktivní

hmotou kladné elektrody je oxid olovičitý. Uvolněné elektrony ze záporných elektrod putují ke kladným elektrodám a zároveň se oxid olovičitý redukuje za vzniku síranu olovnatého a vody. Teoretická hodnota jmenovitého napětí článku je 2,035 V. Kapacita akumulátoru udává, jak je schopen článek dodávat určitou elektrickou energii v požadované době, aniž by došlo k poklesu napětí na minimální přípustnou mez. Při nárůstu teploty se sice mírně zvyšuje kapacita, ale zvyšují se i ztráty a zkracuje se životnost. [7]

### 3.1.5. Akumulátory nikel-kadmiové

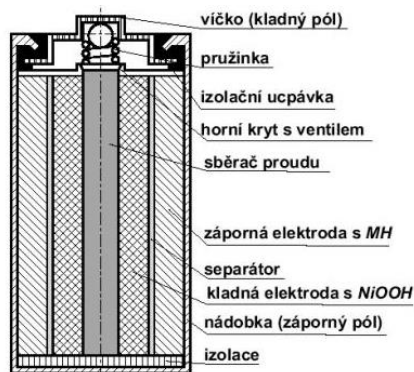
Nejrozšířenější alkalické akumulátory jsou takové, jejichž elektrolytem je vodný roztok hydroxidu alkalického kovu. Výhodami oproti olovným akumulátorům jsou delší životnost, schopnost rychlého nabíjení, větší odolnost proti přebíjení, lépe snášejí zvlnění nabíjecího proudu, menší pokles kapacity při nižších teplotách, větší mechanická odolnost, elektrolyt nepůsobí korozivně na okolní prostředí. Naproti tomu nevýhodami oproti olovným akumulátorům jsou vyšší cena, u zavřených akumulátorů nelze zjišťovat stav plného nabití podle hustoty elektrolytu. Teoretická hodnota jmenovitého napětí je 1,299 V. Na rozdíl od olovných akumulátorů je samovybíjení nejvyšší po nabití a během prvních 14 dnů. Životnost ovlivňuje několik faktorů, jako například intenzita jízdy na akumulátory, velikost nabíjecího napětí, hloubka vybíjení, teplota a koncentrace nečistot v elektrolytu. [7]

### 3.1.6. Akumulátory nikel – metalhydridové

Hlavní složky článku:

- kladná elektroda na bázi sloučenin niklu
- záporná elektroda ze slitiny pohlcující vodík
- elektrolyt
- separátor

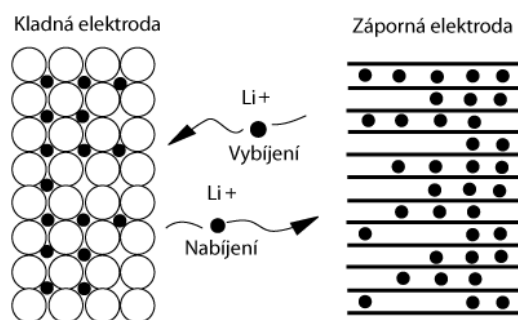
Rozdíl mezi články Ni-Cd a Ni-MH je nahrazení kadmia slitinou kovu pohlcující vodík. Slitina musí mít velkou skladovací kapacitu pro vodík, beztlakové skladování vodíku, velkou odolnost proti oxidaci a vhodné kinetické parametry, aby článek mohl být vybíjen velkými proudy. Hodnota jmenovitého napětí je 1,2 V. Nabíjení je velice závislé na teplotě. Při vyšších teplotách se účinnost nabíjení razantně snižuje. Při nízkých teplotách je účinnost nabíjení vynikající. Obr. 3 popisuje části Ni-MH akumulátoru. [6]



Obr. 3: Akumulátory nikl – metalhydridové

### 3.1.7. Akumulátory Li-ion

Velice často bývá tento systém označován jako „rocking-chair“ (houpací křeslo). Ionty  $\text{Li}^+$  při nabíjení a vybíjení přechází z kladné elektrody do záporné a naopak, viz Obr. 4. Z toho vyplývá, že jejich pohyb můžeme přirovnat k houpání. Elektrody jsou z tzv. interkalárních sloučenin. Jsou to sloučeniny, které mohou do své krystalové mřížky přijmout cizí atom nebo molekulu. Lithium je zde pouze v podobě iontů, proto je zlepšena bezpečnost. Katoda je sloučenina  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  nebo  $\text{LiNiO}_2$ , anoda je z uhlíkové matrice. Požadavky na matici jsou takové, že musí velmi dobře přijímat ionty lithia a naopak i snadno uvolňovat. Elektrolyt se skládá z vodivé soli a rozpouštědla. Poměr mezi vodivou solí a rozpouštědlem se volí takový, aby byl elektrolyt maximálně vodivý. [7]

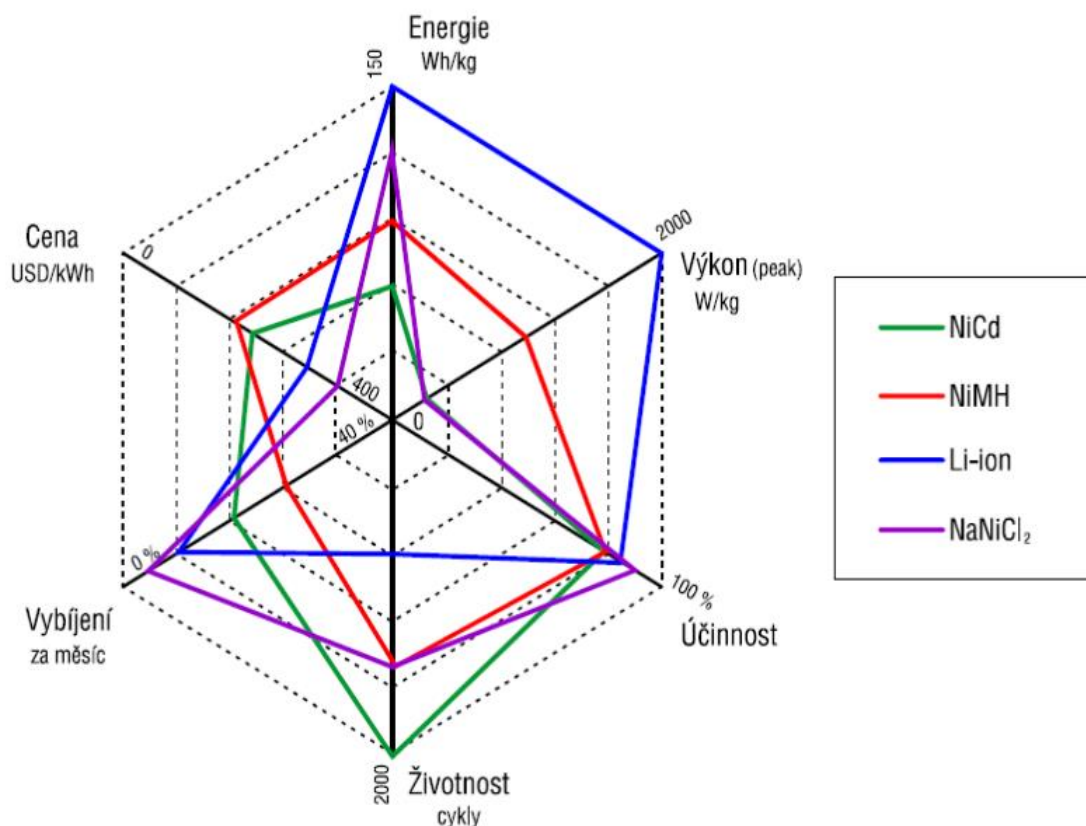


Obr. 4: Akumulátor Li-ion

Nabíjecí charakteristiky, které dodávají výrobci, jsou velice podobné nabíjecím charakteristikám Ni-MH akumulátoru. Nabíjení různými proudy je vždy omezeno napětím v rozmezí 4,1 až 4,2V. Průběh napětí u vybíjecí charakteristiky je dán rychlostí vybíjení a pracovní teplotou. Vybíjení se provádí jen do hodnoty 2,5V. [7]

### 3.1.8. Akumulátory sodík – nikel chloridové

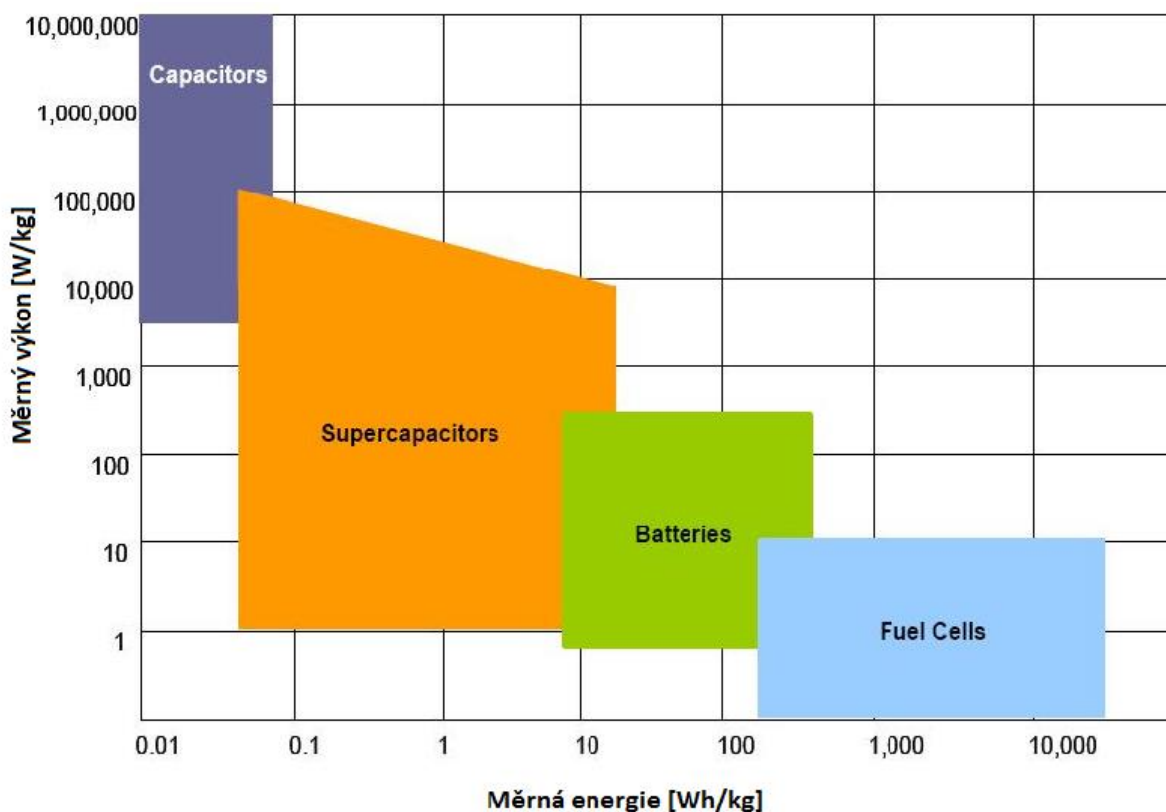
Tento typ akumulátorů se řadí mezi vysokoteplotní akumulátory, tedy baterie využívající roztavenou sůl jako elektrolyt. Tento směr vývoje je pokládán za velmi perspektivní. Teplota tuhnutí elektrolytu je okolo 160 °C a pracovní teplota elektrolytu se pohybuje v rozmezí 270 °C až 350 °C, což značně zmenšuje konstrukci článku. Tyto baterie se stejně jako baterie Li-ion vyznačují vysokým měrným výkonem a energií. Nevýhodou tohoto typu je vysoká teplota elektrolytu, což snižuje bezpečnost při havárii akumulátoru, a také velmi nízká pohltivost energie při nabíjení. Přesto jde o baterie s vlastnostmi velice vhodnými pro trakční účely ve vozidlech, viz Obr. 5. Další nevýhodou je jejich výrobní cena, v současné době je prozatím vysoká. [5]



Obr. 5: Porovnání vlastností nepoužívanějších typů akumulátorů [5]

### 3.2. Porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie

Pro vzájemné porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie, použitelných ve vozidle s elektrickým přenosem výkonu, byly vybrány nejpoužívanější typy akumulátorů a 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 superkapacitorem. Superkapacitor se jeví jako ideální akumulátor v případě, že potřebujeme rychle uložit, nebo naopak vydat energii. Nevýhodou superkapacitoru je podstatně menší měrná energie oproti klasickým akumulátorům. Tato nevýhoda se postupně snižuje, protože superkapacitor je relativně nová součástka a je v současné době neustále vyvíjena a zdokonalována. Směr vývoje se nyní ubírá k použití nanomateriálů (nanotrubic uhlíku), které by měly zásadně zlepšit parametry superkapacitorů. Zároveň je nutné dodat, že oblast využívání superkapacitorů se neustále rozšiřuje, a dá se tedy očekávat, že tato součástka bude ještě více optimalizována. [5]



Obr. 6: Porovnání různých zdrojů elektrické energie podle měrné energie a výkonu [8]

## 4. Zpracování dat a zhodnocení energetických přínosů superkapacitorů

### 4.1. Trolejbus AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m

Vyhodnocovaným objektem je trolejbus AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m, jehož výrobcem je ŠKODA ELECTRIC a.s. Tento trolejbus je postaven na karoserii městského nízkopodlažního autobusu od firmy BredaMenarinibus. Jedná se o 18 m dlouhý, třínápravový kloubový vůz s hnací zadní nápravou. Tento trolejbus je způsobilý provozu jak při napájení z trolejového vedení (750 V DC), tak i při napájení z dieselgenerátoru. Trolejbus typu AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m je určen pro provoz na tratích v Římě.

Zásadním požadavkem od zákazníka pro tento trolejbus bylo, aby se minimálně 85 % brzděné energie využilo samotným vozidlem. To ve výsledku znamená, že vozidlo nevrací energii zpět do sítě, ale veškerou brzděnou energii ukládá do modulů superkapacitorů a z modulů je energie použita pro zlepšení dynamiky jízdy. Při ukládání energie do SC a při překročení 900 V se paralelně spíná brzdový odporník z důvodu ochrany modulů s SC.

#### 4.1.1. Základní parametry

Maximální rychlost.....	70 km/h
Maximální délka trolejbusu.....	17 825 mm
Maximální šířka trolejbusu.....	2 525 mm
Maximální výška trolejbusu .....	3 446 mm
Hmotnost prázdného trolejbusu .....	19 600 kg
Maximální hmotnost loženého trolejbusu .....	30 000 kg

#### Hlavní střešní jednotka

Vstupní napětí .....	750 V DC (+20 %, -30 %)
Maximální proud.....	550 A



### **Trakční střídač**

Vstupní napětí .....	750 V DC (+20 %, -30 %)
Jmenovitý výkon .....	325 kVA
Jmenovitý výstupní proud .....	370 A
Výstupní napětí .....	3 x 0 - 510 V AC
Frekvenční rozsah .....	0-150 Hz

### **Střídač pomocných pohonů**

Jmenovité vstupní napětí .....	750 V DC; (-33% ÷ +20%)
Výstupní napětí .....	3 x 0 - 400V AC, 50Hz
Trvalý výstupní výkon .....	10 kVA

### **Nabíječ baterie 24 V**

Jmenovité vstupní napětí .....	750 V DC; (-33% ÷ +20%)
Výstupní napětí .....	27.5V DC (nastavitelné)
Výstupní proud .....	200A

### **Trakční motor**

Jmenovité otáčky .....	971 min <sup>-1</sup>
Maximální otáčky (navrhované) .....	2234 min <sup>-1</sup>
Jmenovitý výkon .....	260 kW
Sdružené napětí .....	3x510 V
Proud .....	386 A

### **Diesel motor (6 válců, 4 taktní)**

Výkon .....	213kW / 2300 min <sup>-1</sup>
-------------	--------------------------------

### **Generátor (synchronní s permanentními magnety)**

Jmenovitý výkon .....	175kW
Jmenovité otáčky .....	2300 min <sup>-1</sup>
Rozsah otáček .....	1700 - 2300 min <sup>-1</sup>
Napětí .....	750 V DC

### Superkapacitorové moduly

Počet modulů.....	10 (2 paralelní větve)
Celková kapacita .....	25,2 F
Maximální provozní napětí .....	625 V
Minimální provozní napětí .....	430 V
Maximální trvalý proud .....	300 A
Dostupná energie.....	720 Wh

### Brzdový odporník

Maximální napětí při brzdění .....	950 V DC
Trvalý výkon .....	80 kW
Odpor při 20°C .....	1.28 W -5/ +7 %

Na Obr. 7 je zobrazen typový výkres trolejbusu AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m.



Obr. 7: Typový výkres trolejbusu AVANCITY<sup>+</sup> SF 18 m

### 4.1.2. Systém akumulace energie

Návrh systému vycházel z tendrových požadavků a musel garantovat rekuperaci energie o velikosti alespoň 85 % energie při brzdění z rychlosti 55km/h, rozjezd plně loženého vozidla v režimu diesel s definovaným zrychlením na sklonu 12%, rozjezd vozidla v režimu diesel s definovaným zrychlením na 250 m úsecích a minimální životnost systému 10 let.

Pro zajištění zmíněných podmínek přicházelo v úvahu použití dvoukvadrantového nebo čtyřkvadrantového měniče. Dvoukvadrantový měnič byl použit z důvodů jednoduššího řízení,

menší prostorové náročnosti a v neposlední řadě kvůli ceně. Nevýhodou zvoleného měniče je nemožnost řídit měnič při vyšším napětí na SC než stejnosměrného meziobvodu.

Docílení potřebné životnosti a požadované efektivní hodnoty proudu superkapacitorem je dáno vybíjením modulů maximálně k polovině jmenovité hodnoty napětí SC. Na dimenzování superkapacitorů mají největší vliv teplota, proud a napětí.

Při uvažování tendrových požadavků byly zvoleny dvě nezávislé sekce superkapacitorových baterií od firmy Maxwell. Jednu sekci tvoří 5 v sérii spojených modulů o maximální hodnotě napětí 625 V. Každá sekce má vlastní měnič, jistící obvody (pojistka) a výkonový stykač. Dvoukvadrantový měnič umožňuje řídit toky jak ve snižovacím režimu (nabíjení superkapacitorů), tak ve zvyšovacím režimu (vybíjení superkapacitorů) Následuje do série zapojená tlumivka pro správnou funkčnost a vyhlazení proudu. Superkapacity je možné vybit pomocí přepojovače do brzdového odporu pro případ poruchy nebo údržby.

### **4.1.3. Regulace měniče superkapacitorů**

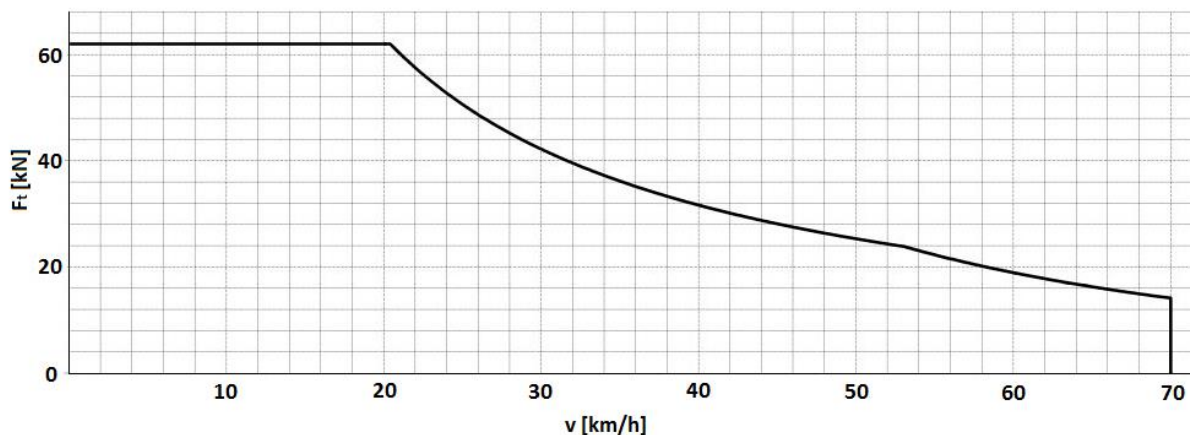
Řízení se skládá ze tří hlavních režimů. Režim „A“ je rozdělen do dvou podrežimů, a to snižovacího – nabíjení superkapacitorů brzdou energií a zvyšovacího – vybíjení superkapacitorů a dodání energie pro rozjezd vozidla. Řízení dále obsahuje dva PI regulátory zařazené do série, které regulují na požadovanou hodnotu napětí stejnosměrného obvodu a požadovaný proud superkapacitorem. Teploty přechodů polovodičových součástek a superkapacitorů jsou omezující faktory, které mají vliv na regulaci. Zlepšení dynamických vlastností lze dosáhnout použitím předvýpočtů závislých na aktuálním výkonu trakčního pohonu, napětí stejnosměrného obvodu, napětí a proudu superkapacitorů. Režim „B“ je určen pro dobíjení superkapacitorů v zastávce v případě, že nedošlo k úplnému dobití během brzdění. Režim „C“ je aktivován v případě poruchy a dochází k nastavení nulového zadání do modulátoru.

### **4.1.4. Dynamika jízdy**

Dynamika jízdy je jeden z nejzákladnějších parametrů každého dopravního prostředku. Musí být splněno několik zásadních podmínek pro rozjezd. Rozjezd nesmí být moc pomalý a nebo naopak moc rychlý z důvodu komfortu cestujících a splnění bezpečnostních požadavků. Dynamika jízdy je závislá na trolejovém napětí. Při poklesu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

napětí troleje dochází ke zhoršení dynamiky jízdy. Nasazením superkapacitorů je docíleno, že případné poklesy trolejového napětí jsou kompenzovány superkapacitory a tím je zaručena lepší dynamika při rozjezdu.



Obr. 7: Trakční charakteristika trolejbusu AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m

Ztráta dynamiky jízdy při poklesu trolejového napětí je znázorněna v tabulkách 2 a 3. Z trakční charakteristiky vozidla (obr. 7) jsou odečteny hodnoty tažné síly ( $F_t$ ) a rychlosti ( $v$ ). První bod tabulky leží na rozhraní mezi konstantní  $F_t$  a odbuzováním. Další body jsou pro výkonovou hyperbolu. Použitím druhého Newtonova zákona bylo spočteno zrychlení. Zrychlení bylo následně korigováno kvůli jízděmu odporu. Výsledné zrychlení je uvedené v posledním sloupci tabulek.

Bod přechodu na výkonovou hyperbolu při sníženém napětí se posouvá doleva přímo úměrně poměrem napětí. Výkon je na výkonové hyperbole konstantní, tudíž je možné spočítat  $F_t$  pro zvolené rychlosti.

pro 750 V							
$F_t$	$v$	$P$	$a$	$p_0$	$F_0$	$F_t - F_0$	$a$ po korekci
[kN]	[km/h]	[kW]	[m/s <sup>2</sup> ]	[N/kN]	[kN]	[kN]	[m/s <sup>2</sup> ]
62,0	20,5	353,056	3,163	12,688	2,440	59,560	3,039
50,4	25,0	350,000	2,571	14,125	2,716	47,684	2,433
42,2	30,0	351,667	2,153	15,940	3,065	39,135	1,997
36,0	35,0	350,000	1,837	17,985	3,458	32,542	1,660
32,0	40,0	355,556	1,633	20,260	3,896	28,104	1,434
28,0	45,0	350,000	1,429	22,765	4,377	23,623	1,205
25,5	50,0	354,167	1,301	25,500	4,903	20,597	1,051
22,0	55,0	336,111	1,122	28,465	5,473	16,527	0,843

Tabulka 2: Dynamika jízdy při napájení 750 V

pro 600 V						
v	P	F <sub>t</sub>	p <sub>0</sub>	F <sub>0</sub>	F <sub>t</sub> -F <sub>0</sub>	a po korekci
[km/h]	[kW]	[kN]	[N/kN]	[kN]	[kN]	[m/s <sup>2</sup> ]
16,4	282,444	62,000	11,541	2,219	59,781	3,050
25,0	282,444	40,672	14,125	2,716	37,956	1,937
30,0	282,444	33,893	15,940	3,065	30,828	1,573
35,0	282,444	29,051	17,985	3,458	25,593	1,306
40,0	282,444	25,420	20,260	3,896	21,524	1,098
45,0	282,444	22,596	22,765	4,377	18,218	0,930
50,0	282,444	20,336	25,500	4,903	15,433	0,787
55,0	282,444	18,487	28,465	5,473	13,014	0,664

Tabulka 3: Dynamika jízdy při napájení 600 V

## 4.2. Měření na trolejbusu AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m

Data, která jsem zpracovával, byla naměřena v Českých Budějovicích při typových zkouškách. Všechny zkoušky byly provedeny oddělením Oborový výzkum ŠKODA TRANSPORTATION a.s. během května 2010. Vyhodnocovaná data pocházejí z typové zkoušky AVANCITY SF 18m Řím „Zkouška rozjezdu, elektrodynamického brzdění a rychlosti“.

Všechna měření byla provedena na loženém i prázdném prototypu trolejbusu Škoda typu AVANCITY<sup>+</sup> SF 18m (VIN: ZCM 3501 SF 90026958) dle normy ČSN 300250, odst. 5.3.10 – Zkouška rozjezdu, elektrodynamického brzdění a rychlosti, dle metodiky ZLDV T4 a požadavků technických podmínek.

### 4.2.1. Požadované parametry zkoušky jízdních vlastností

#### Výkony vozidla (B.2.)

*V režimu jízdy s napájením z troleje:*

Na rovném přímočarém úseku o délce 250 m při plném zatížení a době zastavení o délce 10 vteřin musí vozidlo garantovat následující výkony:

max. rychlost: minimálně 55 km/h a max 70 km/h

cestovní rychlost: minimálně 20 km/h

zrychlení při rozjezdu: minimálně 1,1 m/s<sup>2</sup>

zpomalení: podle směrnice 91/422EHS

max. sklon jízdy s plným zatížením: minimálně 12 %

### *V režimu jízdy na dieselgenerátor:*

Na rovném přímočarém úseku o délce 250 m při plném zatížení a době zastavení o délce 10 vteřin musí vozidlo garantovat následující parametry:

max. rychlost: 50 km/h

cestovní rychlost: minimálně 15 km/h

zrychlení při rozjezdu: minimálně 0,8 m/s<sup>2</sup>

zpomalení: podle směrnice 91/422EHS

max sklon jízdy s plným zatížením: minimálně 12 %

### **Superkapacitory**

(B.3.4.1) Garantovat rekuperaci energie o velikosti alespoň 85 % po brzdění, jímž se vozidlo, které se nacházelo ve stavu plného zatížení, zastaví z rychlosti 55 km/h při zpomalení 1,1 m/s<sup>2</sup>.

(B3.4.5) Při rozjezdu vozidla musí rekuperační systém energie garantovat spolu s dieselgenerátorem výkon, kterým bude zajištěno zrychlení minimálně 0,7 m/s<sup>2</sup> ve stavu při plném zatížení vozidla a sklonu 12%.

### **4.3. Zkouška rozjezdu, elektrodynamického brzdění a rychlosti**

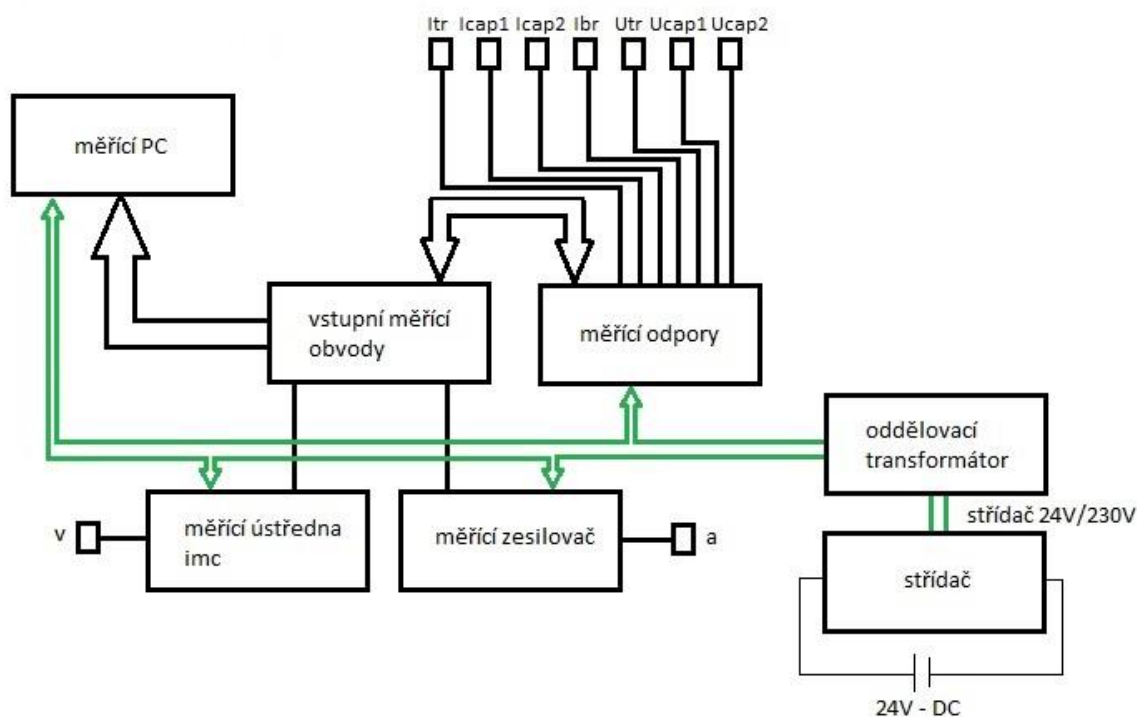
Zkouška byla realizována tak, že ze stání byl pro každý režim čtyřikrát proveden rozjezd na zvolenou rychlost se zadaným 100% poměrným tahem (při plně sešlápnutém jízdním pedálu). Po dosažení požadované rychlosti následoval přechod na maximální provozní brzdu. Při napájení trolejbusu z troleje byly prováděny rozjezdy na rychlost 60 km/h i na jeho maximální provozní rychlost 70 km/h. Měření probíhalo v obou směrech zvolené trasy jak na prázdném, tak i na loženém trolejbusu. V případě měření s loženým trolejbusem hmotnost zátěže činila cca 10,4 t. Měřené veličiny byly zaznamenávány pomocí programu WinScope.

WinScope je program pro zpracování digitálních dat získaných z měřících karet. Jedná se o měřicí a vyhodnocovací program, který zobrazuje naměřená data do grafické podoby a zároveň tyto data ukládá do souboru. Výsledný soubor je rozdělen do dvou částí. První je konfigurační část, která obsahuje informace pro transformaci dat z binárního kódu. Druhou částí jsou data v binárním kódu. Výhodou tohoto programu je možnost převedení naměřených dat do běžných souborů jako je například .txt apod.

Pro následné vyhodnocení naměřených dat byla použita data, která obsahovala minimálně tři kompletní cykly rozjezdu a následného zabrzdění. Pro výsledné vyhodnocení přínosu superkapacitorů byla zkoumána data z prostředního cyklu, aby bylo docíleno toho, že superkapacity před použitím jejich energie na rozjezd jsou plně nabity díky akumulaci z předchozího cyklu. Na Obr. 8 je znázorněno blokové schéma měření.

Naměřená data v ASCII znacích jsem převedl do excelu a následně jsem vyhodnotil tyto veličiny: Výkon z troleje ( $P_{tr}$ ), Výkon pomocných pohonů ( $P_{pp}$ ), Výkon topení ( $P_{top}$ ), Výkon první větve superkapacitorů ( $P_{cap1}$ ), Výkon druhé větve superkapacitorů ( $P_{cap2}$ ), Energie z troleje ( $E_{tr}$ ), Energie pomocných pohonů ( $E_{pp}$ ), Energie topení ( $E_{top}$ ), Energie první větve superkapacitorů ( $E_{cap1}$ ) a Energie druhé větve superkapacitorů ( $E_{cap2}$ ).

### 4.3.1. Blokové schéma měření

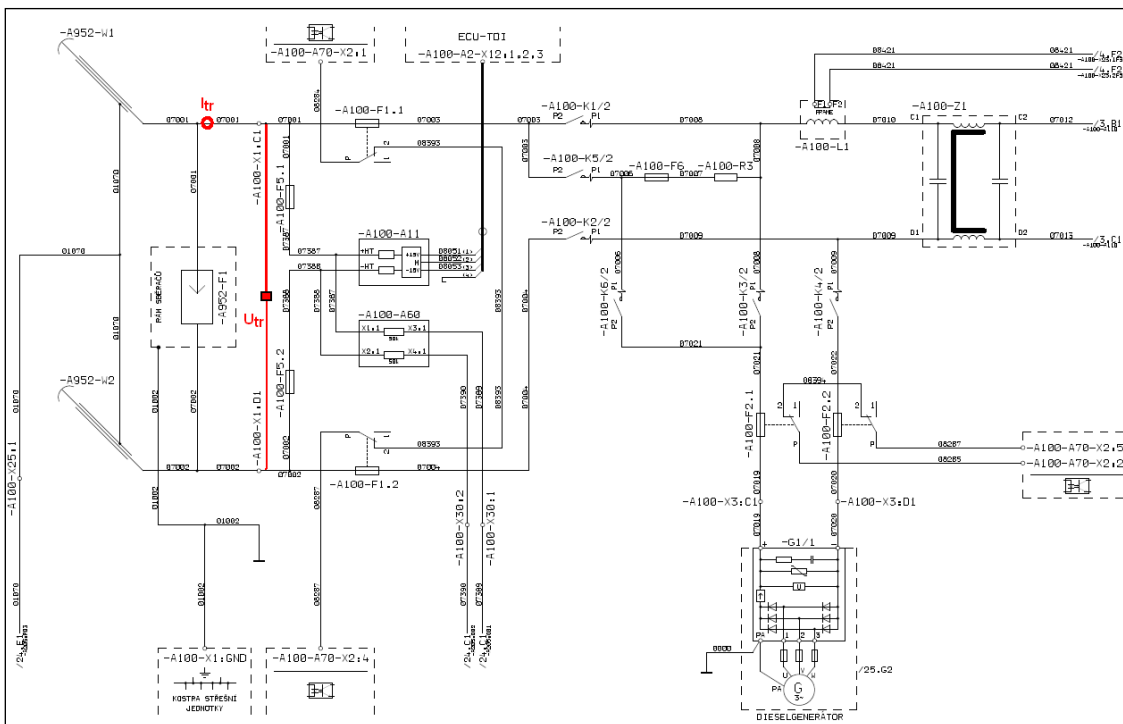


Obr. 8: Blokové schéma pro měření rozjezdu

### 4.3.2. Popis blokového schématu měření

První část v řetězci blokového schématu měření jsou snímače proudů a napětí ( $I_{tr}$ ,  $I_{cap1}$ ,  $I_{cap2}$ ,  $I_{br}$ ,  $U_{tr}$ ,  $U_{cap1}$ ,  $U_{cap2}$ ). Výstup těchto čidel je proudový, z tohoto důvodu následují měřicí odpory, které převádí naměřený proud na napětí. Vstupní měřicí obvody se skládají z měřících karet. Na vstup těchto měřících karet je přiváděno napětí z měřících odporů, výstup z měřících karet je připojen do měřícího počítače, který vyhodnocuje a ukládá naměřená data. Do vstupních měřících obvodů nadále vstupují signály ze snímače rychlosti a ze snímače zrychlení. Signál ze snímače zrychlení je přiveden na měřicí zesilovač, který má za úkol upravit přivedený signál pro vhodné zpracování vstupními měřícími obvody. Signál ze snímače rychlosti je přiveden do měřící ústředny IMC, která obsahuje 5 Hz GPS anténu, výstup z ústředny IMC je napěťový a přiveden do vstupních měřících obvodů. Napájecí síť 230V AC je vytvořena pomocí vozidlové baterie 24 V a následného střídače 24V/230 V. Oddělovací transformátor s převodním poměrem rovným 1 plní funkci galvanického oddělení. Na Obr. 9 – 11 je vidět zapojení, které bylo použito při měření na trolejbusu.

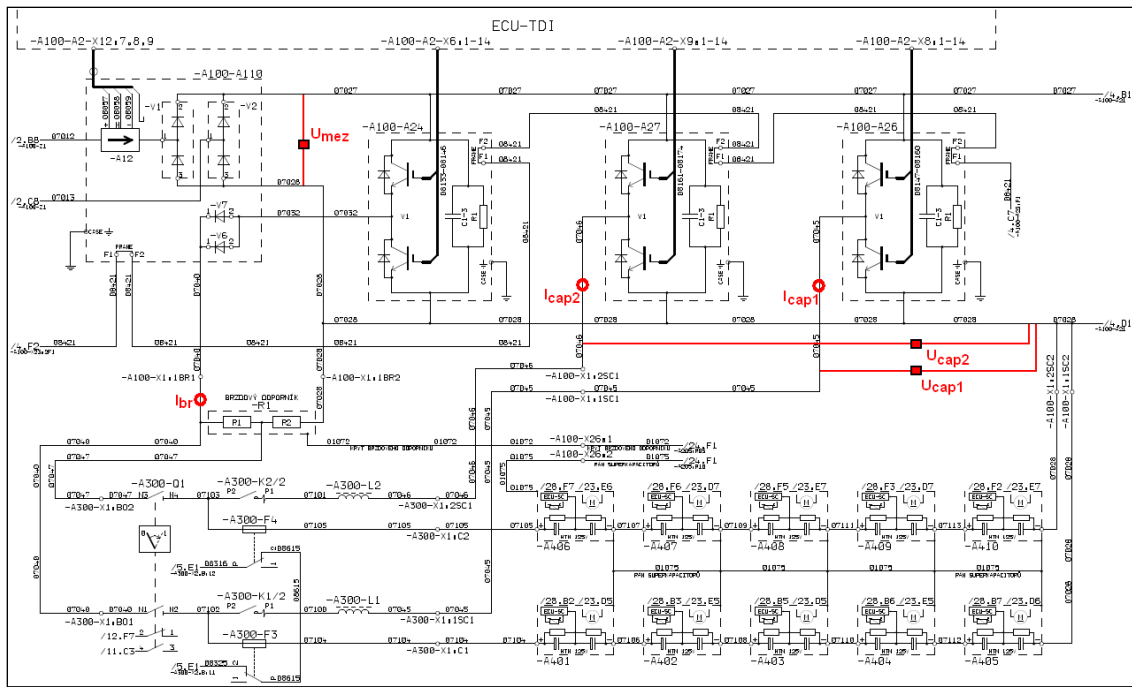
### 4.3.3. Obvodové schéma zapojení trolejbusu



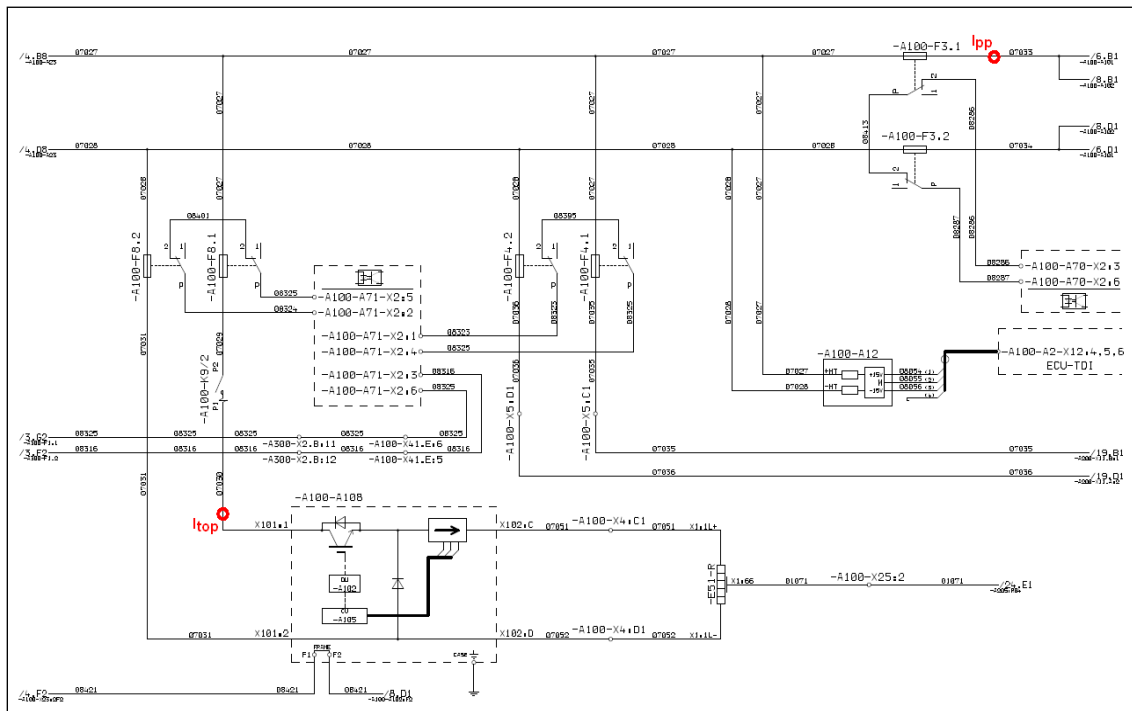
Obrázek č. 9 : Umístění jednotlivých převodníků ve schématu trakčních obvodů zkušného trolejbusu ( $U_{tr}$ ,  $I_{tr}$ )



## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD



Obrázek č. 10 : Umístění jednotlivých převodníků ve schématu trakčních obvodů zkušebního trolejbusu ( $U_{mez}$ ,  $I_{br}$ ,  $U_{cap1}$ ,  $U_{cap2}$ ,  $I_{cap1}$ ,  $I_{cap2}$ )



Obrázek č. 11 : Umístění jednotlivých převodníků ve schématu trakčních obvodů zkušebního trolejbusu ( $I_{pp}$ ,  $I_{top}$ )

#### 4.3.4. Energetická bilance vozidla

Pro vyhodnocení přínosu superkapacitorů při rozjezdu vozidla plně loženého i prázdného byla provedena energetická bilance. Z naměřených dat byly vypočítány výkony a energie, které vozidlo spotřebovává ( $P_{tr}$ ,  $P_{pp}$ ,  $P_{top}$ ,  $E_{tr}$ ,  $E_{pp}$ ,  $E_{top}$ ) a naopak výkony a energie, které vozidlo ukládá do superkapacitorů ( $P_{cap1}$ ,  $P_{cap2}$ ,  $E_{cap1}$ ,  $E_{cap2}$ ) během brzdění. Důležitým faktem při určování energetické bilance vozidla je rozlišit režim rozjezdu a režim brzdy. Při režimu rozjezdu se energie pro rozjezd získává z trolejového vedení a zároveň z obou větví superkapacitorů. Z tohoto pohledu je motor brán jako spotřebič se dvěma zdroji energie. Naproti tomu v režimu brzdy se motor chová jako zdroj elektrické energie a stává se zdrojem pro větve superkapacitorů, které slouží jako uložisko energie. Pomocné pohony a topení vozidla jsou považovány jako spotřebiče v režimu rozjezdu a taktéž i v režimu brzdy.

#### 4.3.5. Vzorce použité při vyhodnocování naměřených dat

$$\text{Výkon troleje:} \quad P_{tr_{avg}} = U_{tr} \cdot I_{tr} \quad [\text{W}] \quad (5)$$

$$\text{Výkon pomocných pohonů:} \quad P_{pp_{avg}} = U_{mez} \cdot I_{pp} \quad [\text{W}] \quad (6)$$

$$\text{Výkon topení:} \quad P_{top_{avg}} = U_{mez} \cdot I_{top} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

$$\text{Výkon SC 1. větve:} \quad P_{cap1_{avg}} = U_{cap1} \cdot I_{cap1} \quad [\text{W}] \quad (8)$$

$$\text{Výkon SC 2. větve:} \quad P_{cap2_{avg}} = U_{cap2} \cdot I_{cap2} \quad [\text{W}] \quad (9)$$

$$\text{Energie troleje:} \quad E_{tr_{avg}} = P_{tr} \cdot \Delta t \quad [\text{J}] \quad (10)$$

$$\text{Energie pomocných pohonů:} \quad E_{pp_{avg}} = P_{pp} \cdot \Delta t \quad [\text{J}] \quad (11)$$

$$\text{Energie topení:} \quad E_{top_{avg}} = P_{top} \cdot \Delta t \quad [\text{J}] \quad (12)$$

$$\text{Energie SC 1. větve:} \quad E_{cap1_{avg}} = P_{cap1} \cdot \Delta t \quad [\text{J}] \quad (13)$$

$$\text{Energie SC 2. větve:} \quad E_{cap2_{avg}} = P_{cap2} \cdot \Delta t \quad [\text{J}] \quad (14)$$

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

Tabulka 4 obsahuje data naměřená během typových zkoušek v Českých Budějovicích. Data byla získána z měření rozjezdu a zrychlení loženého trolejbusu.

t	Utr	Itr	Umez	Ipp	Itop	Ucap1	Ucap2	Icap1	Icap2
[s]	[V]	[A]	[V]	[A]	[A]	[V]	[V]	[A]	[A]
0,1	867,556	46,451	884,287	7,570	39,310	551,707	544,167	0,000	0,000
0,9	894,423	47,876	853,565	7,327	36,279	545,096	544,217	0,032	-2,301
1,9	849,497	60,525	841,767	8,372	35,906	547,653	542,373	0,135	-2,167
2,9	875,863	-5,197	925,804	8,237	36,279	531,484	531,521	-134,136	-130,151
3,9	888,768	18,141	944,607	7,921	36,435	514,550	509,932	-201,729	-203,545
4,9	875,979	117,330	830,868	8,031	36,042	494,528	492,769	-211,181	-211,008
5,9	865,132	223,142	834,626	8,035	35,557	479,326	478,403	-218,936	-218,668
6,9	866,385	255,636	934,475	8,258	36,147	460,244	453,733	-226,689	-222,475
7,9	863,271	257,560	838,154	7,778	37,361	432,751	431,884	-236,665	-236,981
8,9	852,159	251,544	828,744	7,776	38,703	418,488	416,559	-248,043	-248,186
9,9	861,490	255,138	926,179	8,507	38,609	396,782	389,076	-260,197	-259,740
10,9	871,256	341,421	834,386	8,671	38,118	388,150	377,744	-186,529	-185,464
11,9	817,298	610,417	827,914	8,594	37,139	392,177	385,713	0,174	-2,377
12,9	843,128	629,624	864,114	8,404	37,011	390,025	381,643	0,267	-2,301
13,9	831,786	637,329	817,470	8,185	36,894	387,521	384,731	0,125	-2,369
14,9	822,957	650,565	807,218	8,643	37,144	387,876	380,773	0,267	-2,478
15,9	838,607	525,830	855,108	9,144	38,621	390,009	385,304	0,291	-1,983
16,9	883,503	48,774	893,043	7,846	39,287	391,541	385,205	0,199	-2,146
17,9	890,656	0,289	885,200	8,105	34,552	436,530	436,593	317,261	313,260
18,9	863,423	0,772	868,583	7,363	34,600	458,677	443,162	297,831	293,085
19,9	886,689	0,468	1 004,576	8,034	36,409	473,197	463,085	277,994	276,161
20,9	899,045	0,445	920,838	7,751	36,719	487,773	483,796	258,905	253,257
21,9	880,843	0,178	870,367	7,261	37,645	520,308	514,066	235,627	230,476
22,9	869,707	0,932	962,107	7,790	37,648	528,820	517,079	190,030	185,867
23,9	875,487	0,604	927,246	7,402	37,619	542,876	518,028	153,577	149,325
24,9	900,198	0,662	907,000	7,432	36,843	553,162	543,012	119,475	115,386
25,9	873,460	-3,149	938,511	7,449	37,712	554,649	546,009	88,397	84,375
26,9	884,615	0,855	936,057	7,598	37,703	559,854	554,913	52,713	46,190
27,9	902,815	1,233	944,109	7,549	37,353	557,822	548,532	11,397	8,728
28,9	864,496	36,105	843,809	7,896	39,058	553,284	546,946	-0,474	-2,206
29,9	877,491	48,680	880,224	7,441	38,887	558,884	549,841	1,104	0,616

Tabulka 4: Naměřená data loženého trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

V tabulce 5 jsou uvedena data, které jsem vypočítal na základě naměřených dat z měření rozjezdu a zrychlení. Správnost hodnot velikostí energií superkapacitorů jsem následně ověřil vzorcem:  $E = \frac{1}{2}CU^2$ .

Ptr	Ppp	Ptop	Pcap1	Pcap2	Etr	Epp	Etop	Ecap1	Ecap2
[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]
40,299	6,694	34,761	0,000	0,000	0,000	8,060	1,339	6,952	0,000
42,821	6,254	30,966	0,017	-1,252	41,144	6,592	33,230	-0,021	-1,139
51,416	7,047	30,224	0,074	-1,175	87,179	13,079	63,144	-0,056	-2,312
-4,552	7,626	33,587	-71,291	-69,178	125,494	20,490	95,862	-32,955	-33,964
16,123	7,482	34,417	-103,800	-103,794	129,113	27,968	130,872	-127,788	-126,729
102,779	6,673	29,946	-104,435	-103,978	197,697	35,201	162,780	-232,338	-229,193
193,047	6,706	29,677	-104,942	-104,611	353,084	41,959	193,219	-337,352	-333,372
221,479	7,717	33,778	-104,332	-100,944	569,843	49,460	225,174	-442,130	-436,407
222,344	6,519	31,314	-102,417	-102,348	796,990	56,530	257,056	-545,410	-537,824
214,355	6,444	32,075	-103,803	-103,384	1 011,122	63,030	288,553	-649,280	-640,875
219,799	7,879	35,759	-103,241	-101,059	1 228,196	70,702	322,836	-752,498	-742,866
297,465	7,235	31,805	-72,401	-70,058	1 484,629	78,104	356,760	-842,310	-831,474
498,893	7,115	30,748	0,068	-0,917	1 896,001	84,824	387,105	-870,544	-860,225
530,854	7,262	31,982	0,104	-0,878	2 411,203	91,895	419,018	-870,450	-861,097
530,121	6,691	30,160	0,048	-0,911	2 941,578	98,393	449,750	-870,392	-862,007
535,387	6,977	29,983	0,104	-0,944	3 472,029	104,756	479,510	-870,286	-862,904
440,965	7,819	33,025	0,113	-0,764	3 989,153	111,723	511,548	-870,202	-863,679
43,092	7,007	35,085	0,078	-0,827	4 046,454	118,651	546,657	-870,081	-864,536
0,257	7,175	30,585	138,494	136,767	4 052,845	125,960	579,955	-790,378	-786,712
0,667	6,395	30,053	136,608	129,884	4 053,538	132,697	610,223	-656,107	-656,576
0,415	8,071	36,576	131,546	127,886	4 053,760	140,143	644,527	-523,162	-528,834
0,400	7,137	33,812	126,287	122,525	4 054,442	147,879	680,330	-394,621	-405,724
0,157	6,320	32,765	122,599	118,480	4 055,099	154,789	713,038	-269,101	-283,472
0,811	7,495	36,221	100,492	96,108	4 055,226	162,225	748,035	-160,447	-179,149
0,529	6,863	34,882	83,373	77,355	4 055,953	169,490	783,330	-70,000	-92,627
0,596	6,741	33,417	66,089	62,656	4 056,776	176,651	818,537	2,710	-23,381
-2,751	6,991	35,393	49,029	46,070	4 056,864	183,125	851,868	58,120	28,964
0,756	7,112	35,292	29,512	25,631	4 057,543	190,544	887,975	94,758	63,443
1,113	7,127	35,265	6,357	4,788	4 058,371	197,639	923,061	109,754	76,226
31,213	6,663	32,957	-0,262	-1,207	4 074,281	204,472	955,390	110,553	75,859
42,716	6,550	34,229	0,617	0,339	4 114,611	211,542	990,363	110,656	75,566

Tabulka 5: Dupočítané hodnoty výkonů a energií loženého trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

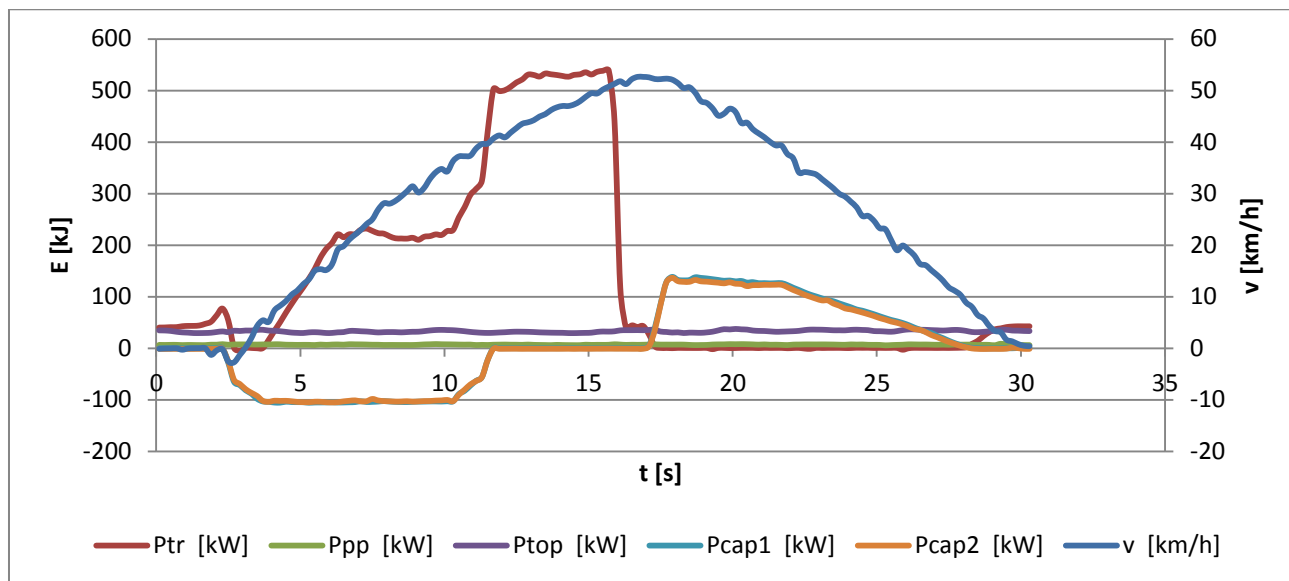
Přínos superkapacitorů na spotřebu elektrické energie je patrný z tabulky 6. Spotřeba vozidla bez superkapacitorů je znatelně vyšší než u vozidla se superkapacitory.

<b>t</b>	<b>Ecap1</b>	<b>Ecap2</b>	<b>Etr</b>	<b>Ebez_sc</b>
<b>[s]</b>	<b>[kJ]</b>	<b>[kJ]</b>	<b>[kJ]</b>	<b>[kJ]</b>
0,1	0,004	0,214	8,060	8,278
0,9	0,021	1,139	41,144	42,305
1,7	0,071	2,077	76,896	79,044
2,5	5,683	7,875	126,260	139,818
3,3	66,812	67,076	125,764	259,652
4,1	148,822	147,065	135,890	431,777
4,9	232,338	229,193	197,697	659,228
5,7	316,364	312,450	314,475	943,288
6,5	400,327	395,858	481,298	1 277,483
7,3	483,498	477,484	662,307	1 623,289
8,1	566,058	558,375	840,425	1 964,858
8,9	649,280	640,875	1 011,122	2 301,276
9,7	731,850	722,654	1 184,237	2 638,740
10,5	811,336	801,422	1 370,397	2 983,155
11,3	866,097	855,339	1 611,510	3 332,945
12,1	870,530	860,404	1 996,155	3 727,088
12,9	870,450	861,097	2 411,203	4 142,750
13,7	870,402	861,825	2 835,554	4 567,781
14,5	870,322	862,551	3 258,669	4 991,543
15,3	870,248	863,240	3 685,521	5 419,009
16,1	870,187	863,839	4 012,627	5 746,653
16,7	870,097	864,371	4 037,835	5 772,303

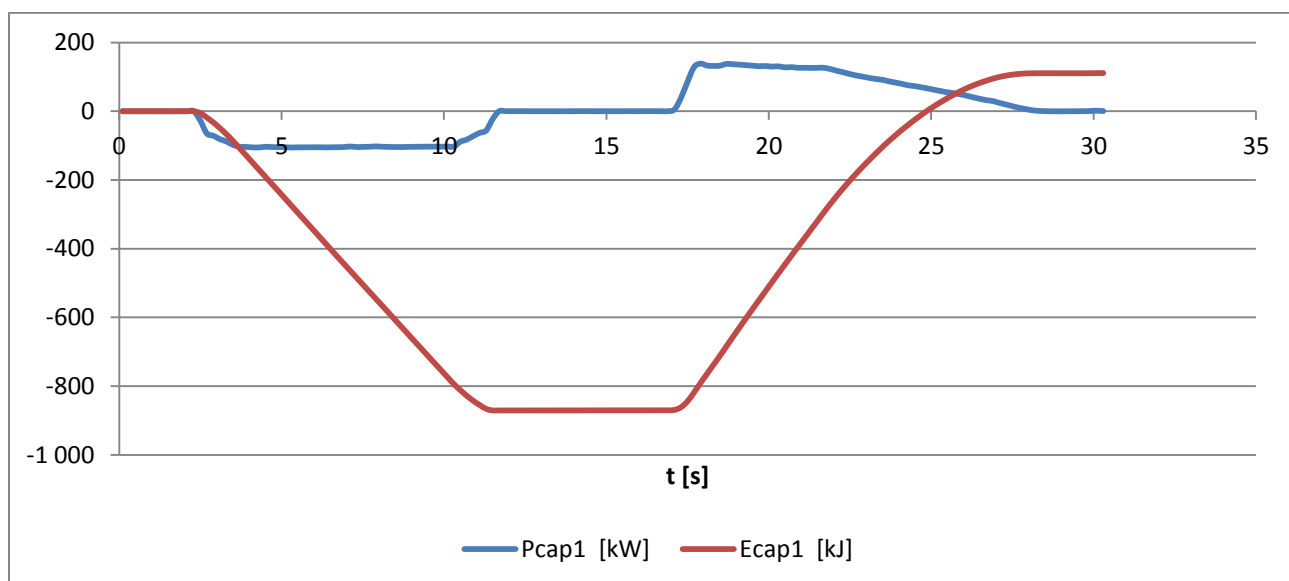
*Tabulka 6: Porovnání spotřeby energie loženého trolejbusu se superkapacitory a bez superkapacitorů při rozjezdu*

Na obr. 12 je vidět, jakou měrou se podílí superkapacitory na rozjezdu vozidla. Ihned při rozjezdu je využívána energie z troleje spolu s energií ze superkapacitorů. Při brzdění je vidět, že se energie akumuluje do superkapacitorů. Obr. 13 a obr. 14 zachycuje průběh energie na superkapacitorech. Po dobu rozjezdu se energie odebírá a při brzdění je akumulována. Na obr. 15 je vidět celkový poměr energií, které se spotřebovávají při rozjezdu a zároveň jaká energie je naakumulována během brzdění.

### 4.3.6. Grafy - ložený trolejbus

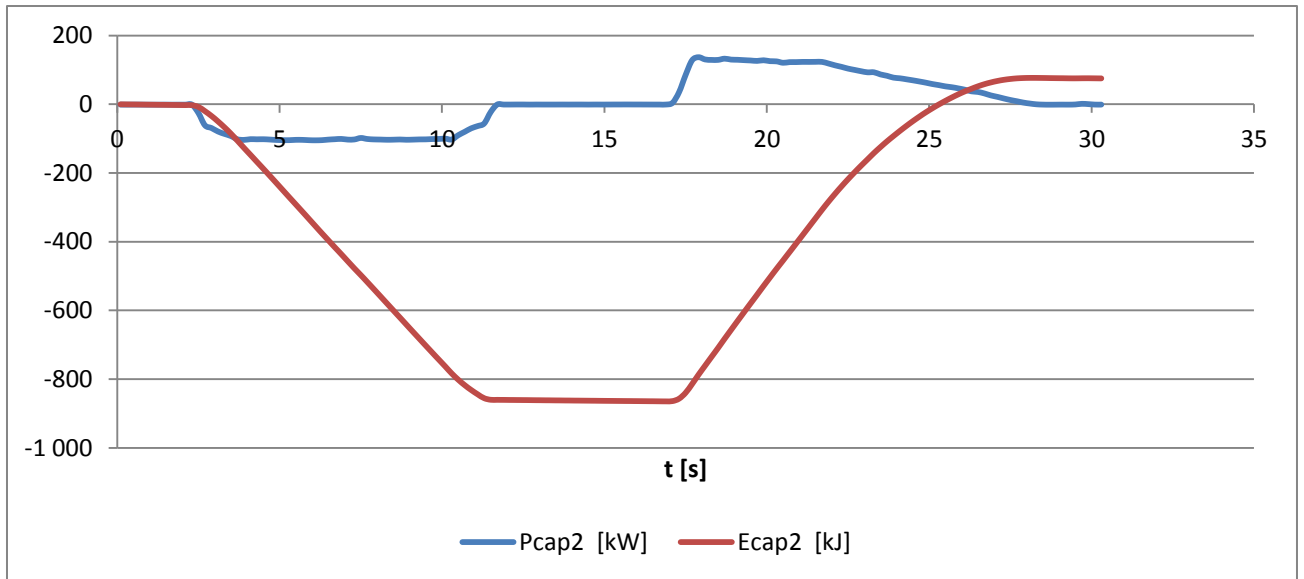


Obr. 12: Průběh výkonů loženého trolejbusu

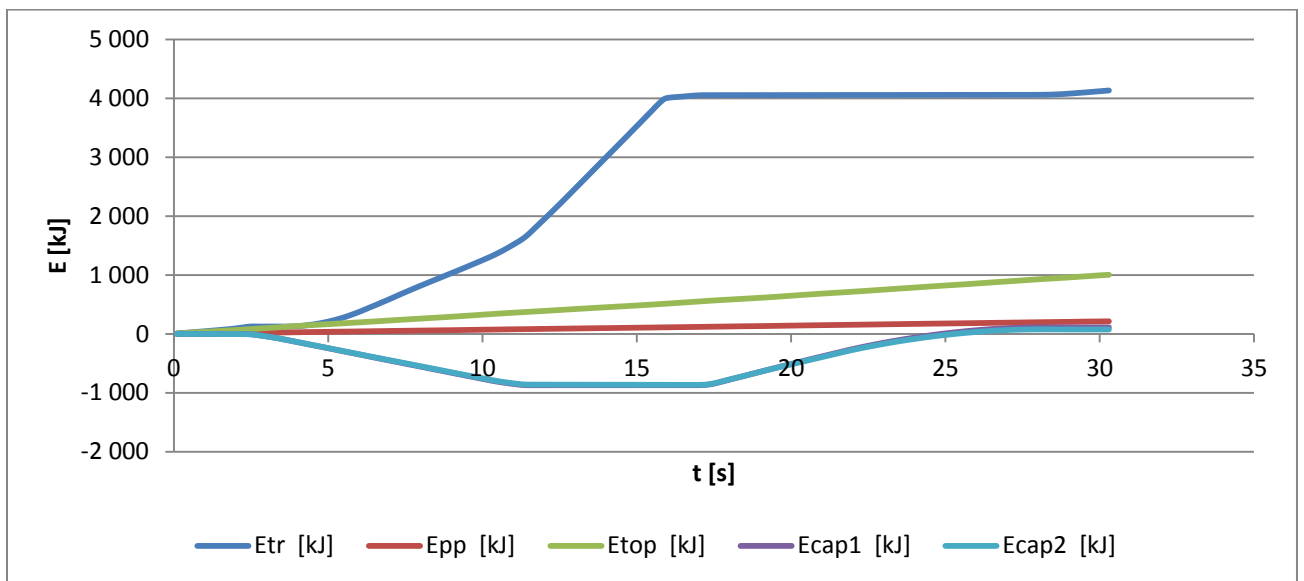


Obr. 13: Průběh výkonu a energie první větve superkapacitorů u loženého trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD



Obr. 14: Průběh výkonu a energie druhé větve superkapacitorů u loženého trolejbusu



Obr. 15: Průběh energie loženého trolejbusu

### 4.3.7. Výsledky měření - ložený trolejbus

Z vypočítaných a graficky znázorněných dat vyplývá, že energie, která se využívá k rozjezdu z první větve superkapacitorů, je 870,081 kJ a z druhé větve je rovna 864,536 kJ.

$$E_{sc\_rozjezd} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} \quad (15)$$

$$E_{sc\_rozjezd} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} = E_{cap1} + E_{cap2} = 870,081 + 864,536 = 1734,617 \text{ kJ}$$

Sečtením energií z obou větví se superkapacitory jsem získal velikost energie, která je použita při rozjezdu vozidla. Pro zjištění celkové energie, která je zapotřebí při rozjezdu vozidla, jsem sečetl energii ze superkapacitorů s energií z troleje.

$$E_{celk} = E_{sc\_rozjezd} + E_{tr} \quad (16)$$

$$E_{celk} = E_{sc\_rozjezd} + E_{tr} = 1734,617 + 4046,454 = 5781,071 \text{ kJ}$$

Energie odebraná z troleje dosahuje úrovně 4 046,454 kJ. Superkapacitory se podílejí na rozjezdu 1734,617 kJ. Celková energie pro rozjezd je 5781,071 kJ. Pro lepší představení významu superkapacitorů jsem vše vyjádřil v procentech.

$$E_{celk} = 5781,071 \text{ kJ} = 100\%$$

$$E_{sc\_rozjezd} = 1734,617 \text{ kJ} = 30\%$$



## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

V režimu brzdy se energie vzniklá brzděním ukládá do superkapacitorů. Z naměřených dat jsem vypočítal, že energie naakumulovaná do první větve se superkapacitory je 981,09 kJ. Energie naakumulovaná do druhé větve se superkapacitory je 939,681 kJ.

Výsledné množství naakumulované energie je dáno vztahem:

$$E_{akum} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} \quad (17)$$

$$E_{sc\_rozjezd} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} = E_{cap1} + E_{cap2} = 981,09 + 939,681 = 1920,771 \text{ kJ}$$

Během brzdění je energie, která se naakumuluje do superkapacitorů, 1920,771 kJ. Pro lepší přehlednost jsem vypočítané hodnoty vyjádřil v procentech.

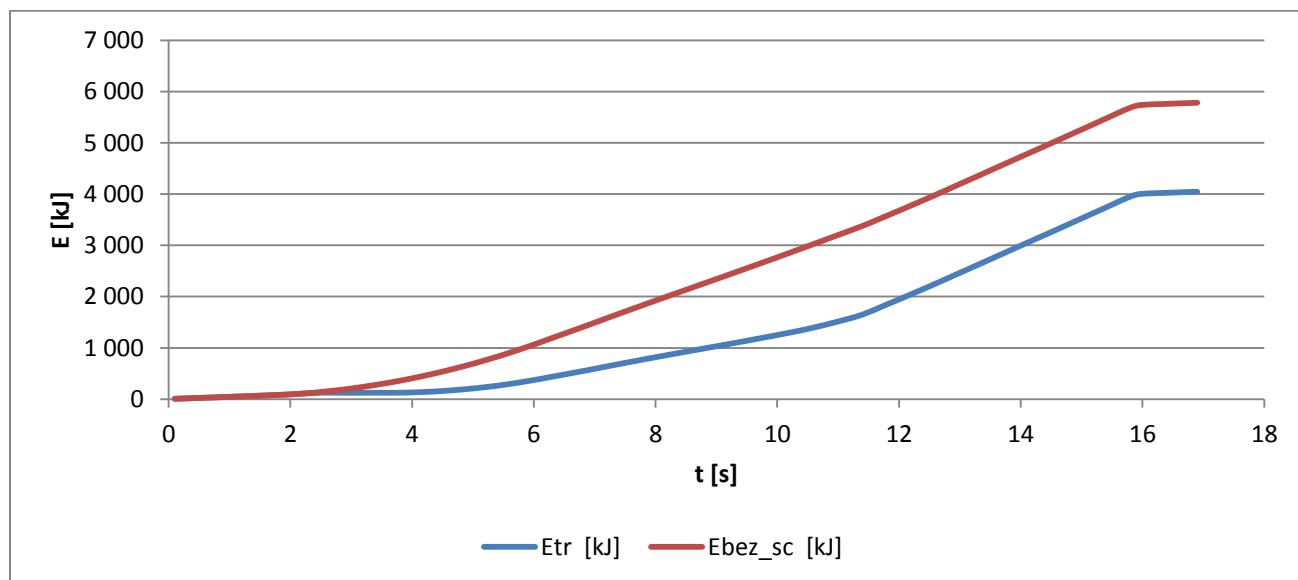
$$E_{celk} = 5781,071 \text{ kJ} = 100\%$$

$$E_{akum} = 1920,771 \text{ kJ} = 33,23\%$$

Z pohledu celkové energetické bilance je nasazením superkapacitorů naakumulováno a následně využito 33,23 %. Většina této energie je použita pro rozjezd vozidla – 30 % a zbytek – 3,23 % spotřebují pomocné pohony. Na obrázku č. 15 jsou znázorněny grafy spotřeby energie při rozjezdu. Jedna křivka zobrazuje spotřebu elektrické energie při rozjezdu se superkapacitory a druhá křivka zobrazuje spotřebu elektrické energie bez superkapacitorů.

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

Obr. 16 porovnává spotřebovanou energii u vozidla vybaveným superkapacitory ( $E_{tr}$ ) s vozidlem bez superkapacitorů ( $E_{bez\_sc}$ ). Z grafu vyplývá, že u loženého vozidla se superkapacitory je úspora energie kolem 30%.



Obr. 16: Průběh spotřebované energie se superkapacitory a bez superkapacitorů u loženého trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

Tabulka 7 obsahuje data naměřená během typových zkoušek v Českých Budějovicích. Data byla získána z měření rozjezdu a zrychlení prázdného trolejbusu.

t	Utr	Itr	Umez	Ipp	Itop	Ucap1	Ucap2	Icap1	Icap2
[s]	[V]	[A]	[V]	[A]	[A]	[V]	[V]	[A]	[A]
0,3	883,462	45,689	897,728	7,858	0,062	596,227	588,054	-15,206	-15,629
1,3	884,979	0,634	952,957	7,007	0,262	573,088	566,655	-174,297	-172,741
2,3	836,513	140,239	852,019	7,517	-0,153	557,607	548,797	-191,694	-191,306
3,3	813,390	230,110	853,948	7,956	0,203	540,948	530,268	-197,278	-196,781
4,3	868,478	212,378	874,487	7,288	0,242	522,681	511,358	-202,876	-203,047
5,3	830,313	208,803	783,061	7,971	-0,112	506,529	503,164	-209,518	-209,573
6,3	840,004	215,013	881,277	8,237	0,126	488,810	482,470	-215,717	-215,804
7,3	860,089	225,575	840,121	8,003	0,199	471,320	467,563	-223,874	-224,876
8,3	821,717	233,326	803,825	8,200	0,048	451,077	447,808	-233,866	-233,744
9,3	846,767	237,237	892,280	7,146	0,198	429,407	423,361	-243,659	-243,553
10,3	853,692	245,278	849,449	7,121	0,299	405,924	398,336	-255,753	-256,083
11,3	816,884	289,550	808,793	8,092	-0,054	384,627	378,356	-226,137	-225,704
12,3	817,910	591,216	793,409	8,264	0,182	386,244	385,176	-24,049	-25,821
13,3	802,988	536,781	779,301	8,930	0,029	393,279	393,053	0,690	-1,954
14,3	864,390	6,393	859,519	7,947	0,133	393,002	391,064	0,453	-2,262
15,3	852,873	-0,139	937,253	6,994	0,117	437,409	429,143	351,154	347,647
16,3	923,458	0,716	988,076	7,398	0,185	461,909	453,980	328,767	323,713
17,3	880,936	0,599	873,316	7,634	-0,104	493,578	488,630	304,681	299,403
18,3	853,885	-0,612	937,335	7,919	0,155	516,288	507,368	283,435	278,528
19,3	926,034	0,732	950,500	7,503	0,185	538,695	529,572	266,685	260,484
20,3	872,732	0,794	870,044	7,516	-0,239	562,991	559,058	245,792	240,410
21,3	871,650	-0,799	967,850	7,245	0,089	572,346	563,521	215,702	210,218
22,3	889,149	0,667	934,714	7,553	0,153	585,903	578,800	176,603	171,903
23,3	904,784	0,448	885,806	7,807	-0,203	603,604	595,390	140,661	136,170
24,3	864,236	-1,004	966,190	7,253	0,147	600,906	585,421	105,320	101,101
25,3	892,623	0,719	918,765	7,427	0,178	605,424	597,826	72,155	67,744
26,3	908,535	0,756	885,394	7,103	-0,243	616,297	609,218	37,451	32,825
27,3	832,738	1,237	933,205	7,225	0,058	608,429	596,949	4,604	3,397
28,3	862,204	24,845	861,038	7,268	0,239	602,796	590,502	9,507	7,014
29,3	846,179	7,933	841,778	6,885	0,241	609,159	604,292	0,036	-1,879
30,3	851,042	6,945	864,575	7,294	0,182	608,164	597,226	0,097	-1,694
31,3	863,502	9,838	854,216	7,186	0,264	604,766	599,399	0,216	-1,751

Tabulka 7: Naměřená data prázdného trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

V tabulce 8 jsou uvedena data, které jsem vypočítal na základě naměřených dat z měření rozjezdu a zrychlení. Správnost hodnot velikostí energií superkapacitorů byla následně ověřena vzorcem:  $E = \frac{1}{2}CU^2$ .

Ptr	Ppp	Ptop	Pcap1	Pcap2	Etr	Epp	Etop	Ecap1	Ecap2
[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]
40,364	7,054	0,056	-9,066	-9,191	14,850	2,783	0,051	-1,800	-1,974
0,561	6,677	0,250	-99,888	-97,885	15,495	9,506	0,250	-76,056	-72,440
117,312	6,405	-0,130	-106,890	-104,988	80,029	15,866	0,358	-182,502	-176,440
187,169	6,794	0,173	-106,717	-104,347	260,545	22,442	0,485	-289,547	-282,003
184,446	6,373	0,212	-106,039	-103,830	452,659	29,304	0,687	-395,548	-385,725
173,372	6,242	-0,088	-106,127	-105,450	623,722	35,384	0,796	-501,289	-490,149
180,612	7,259	0,111	-105,445	-104,119	799,681	42,140	0,960	-607,166	-594,933
194,015	6,723	0,167	-105,516	-105,144	991,138	49,078	1,170	-712,525	-699,071
191,728	6,591	0,039	-105,492	-104,672	1 183,118	55,542	1,329	-818,016	-803,448
200,884	6,376	0,177	-104,629	-103,111	1 379,385	61,988	1,494	-922,834	-907,357
209,392	6,049	0,254	-103,816	-102,007	1 586,003	68,295	1,676	-1 026,621	-1 009,429
236,529	6,545	-0,044	-86,978	-85,396	1 800,852	74,016	1,819	-1 125,978	-1 106,967
483,561	6,557	0,144	-9,289	-9,946	2 132,402	80,616	1,969	-1 179,891	-1 160,259
431,029	6,959	0,023	0,271	-0,768	2 615,604	87,510	2,081	-1 179,682	-1 161,066
5,526	6,831	0,114	0,178	-0,885	2 653,649	93,971	2,228	-1 179,522	-1 161,900
-0,119	6,555	0,110	153,598	149,190	2 654,102	100,197	2,311	-1 068,548	-1 054,520
0,661	7,310	0,183	151,860	146,959	2 654,705	107,525	2,486	-917,414	-908,245
0,528	6,667	-0,091	150,384	146,297	2 655,280	114,489	2,563	-767,575	-762,754
-0,523	7,423	0,145	146,334	141,316	2 655,690	121,321	2,741	-619,256	-618,747
0,678	7,132	0,176	143,662	137,945	2 656,358	128,694	2,890	-474,230	-479,052
0,693	6,539	-0,208	138,379	134,403	2 656,998	135,330	2,973	-333,442	-342,781
-0,696	7,012	0,086	123,456	118,462	2 657,264	141,844	3,077	-201,329	-215,824
0,593	7,060	0,143	103,472	99,497	2 657,850	149,035	3,185	-90,285	-109,073
0,405	6,915	-0,180	84,904	81,074	2 658,447	156,206	3,222	1,304	-21,654
-0,868	7,008	0,142	63,287	59,187	2 658,779	163,093	3,298	72,877	46,007
0,642	6,824	0,164	43,684	40,499	2 659,377	170,279	3,439	124,522	94,592
0,687	6,289	-0,215	23,081	19,998	2 660,038	176,971	3,482	156,083	123,142
1,030	6,742	0,054	2,801	2,028	2 660,792	183,391	3,597	166,081	131,127
21,421	6,258	0,206	5,731	4,142	2 672,599	189,933	3,788	168,876	132,691
6,713	5,796	0,203	0,022	-1,135	2 685,153	196,046	3,876	171,489	134,021
5,910	6,306	0,157	0,059	-1,012	2 691,434	202,439	4,027	171,572	132,904
8,495	6,138	0,226	0,131	-1,050	2 697,785	208,665	4,193	171,699	131,796

Tabulka 8: Dypočítané hodnoty výkonů a energií prázdného trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

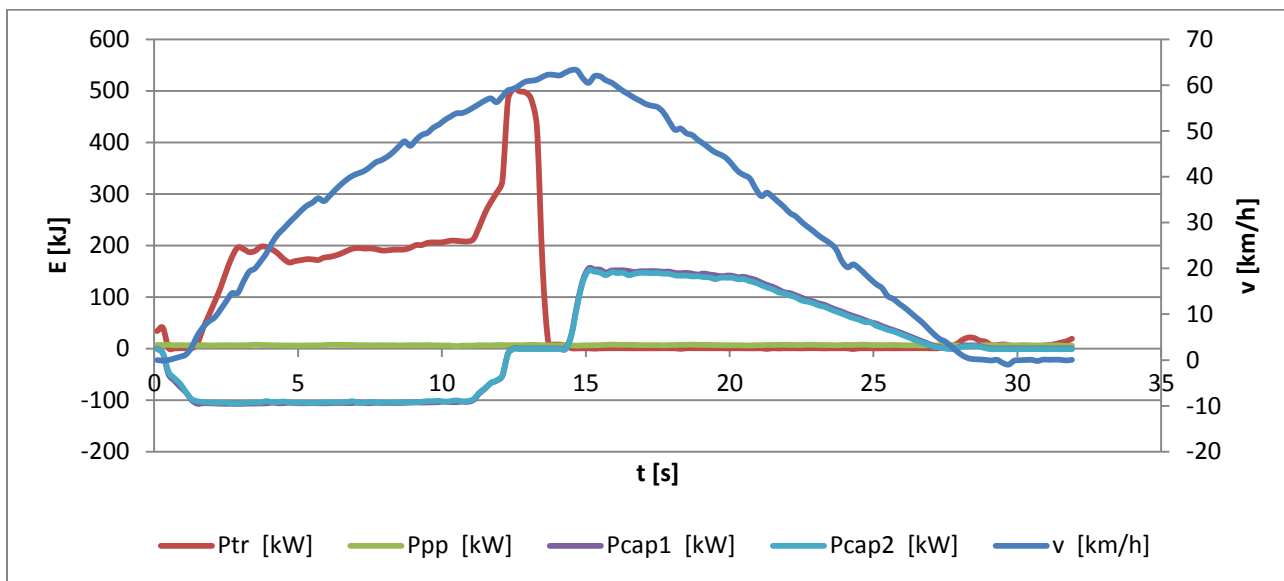
Přínos superkapacitorů na spotřebu elektrické energie je patrný z tabulky 9. Spotřeba vozidla bez superkapacitorů je znatelně vyšší než u vozidla se superkapacitory. U prázdného vozidla je přínos podstatně vyšší než u loženého vozidla.

<b>t</b>	<b>Ecap1</b>	<b>Ecap2</b>	<b>Etr</b>	<b>Ebez_sc</b>
<b>[s]</b>	<b>[kJ]</b>	<b>[kJ]</b>	<b>[kJ]</b>	<b>[kJ]</b>
0,1	-0,013	0,136	6,777	6,900
0,9	39,111	36,071	15,250	90,431
1,7	118,627	113,584	25,491	257,702
2,5	203,909	197,315	109,811	511,035
3,3	289,547	282,003	260,545	832,095
4,1	374,340	364,959	415,770	1 155,069
4,9	458,862	448,112	554,755	1 461,729
5,7	543,668	532,333	692,692	1 768,693
6,5	628,279	615,788	836,595	2 080,662
7,3	712,525	699,071	991,138	2 402,734
8,1	796,918	782,514	1 144,773	2 724,205
8,9	881,065	865,912	1 299,070	3 046,047
9,7	964,543	948,129	1 461,590	3 374,262
10,5	1 047,397	1 029,538	1 627,826	3 704,761
11,3	1 125,978	1 106,967	1 800,852	4 033,796
12,1	1 178,033	1 158,270	2 035,689	4 371,992
12,9	1 179,764	1 160,749	2 432,490	4 773,003
13,7	1 179,612	1 161,395	2 649,386	4 990,394
14,3	1 179,522	1 161,900	2 653,649	4 995,071

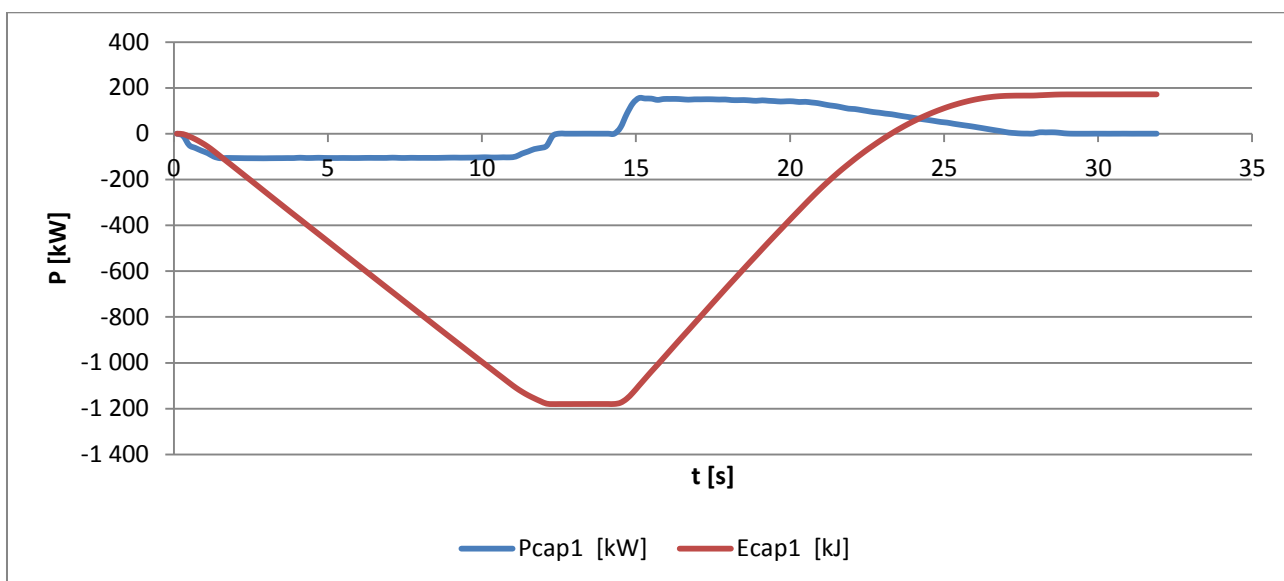
*Tabulka 9: Porovnání spotřeby energie prázdného trolejbusu se superkapacitory a bez superkapacitorů při rozjezdu*

Na obr. 17 je vidět, jakou měrou se podílí superkapacitory na rozjezdu vozidla. Ihned při rozjezdu je využívána energie z troleje spolu s energií ze superkapacitorů. Při brzdění je vidět, že se energie akumuluje do superkapacitorů. Obr. 18 a obr. 19 zachycuje průběh energie na superkapacitorech. Po dobu rozjezdu se energie odebírá a při brzdění je akumulována. Na obr. 20 je vidět celkový poměr energií, které se spotřebovávají při rozjezdu a zároveň jaká energie je naakumulována během brzdění.

### 4.3.8. Grafy - prázdný trolejbus

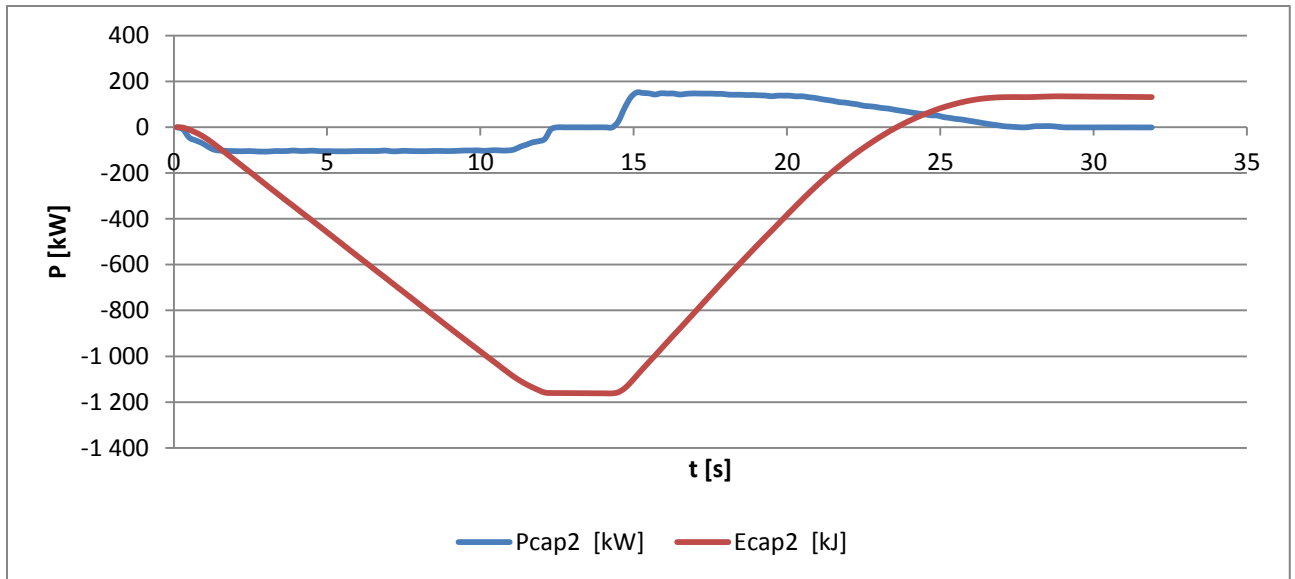


Obr. 17: Průběh výkonů prázdného trolejbusu

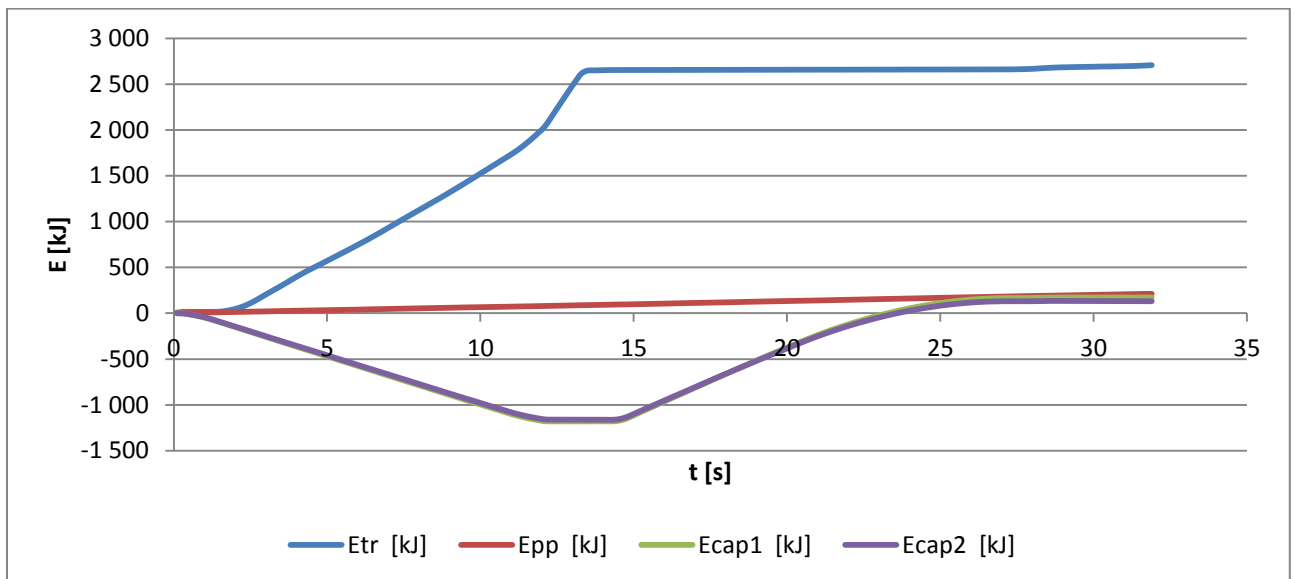


Obr. 18: Průběh výkonu a energie první větve superkapacitorů u prázdného trolejbusu

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD



Obr. 19: Průběh výkonu a energie druhé větve superkapacitorů u prázdného trolejbusu



Obr. 20: Průběh energie prázdného trolejbusu

### 4.3.9. Výsledky měření - prázdný trolejbus

Z vypočítaných a graficky znázorněných dat vyplývá, že energie, která se využívá k rozjezdu z první větve superkapacitorů, je 1179,522 kJ a z druhé větve je rovna 1161,9 kJ.

$$E_{sc\_rozjezd} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} \quad (15)$$

$$E_{sc\_rozjezd} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} = E_{cap1} + E_{cap2} = 1179,522 + 1161,9 = 2341,422 \text{ kJ}$$

Sečtením energií z obou větví se superkapacitory jsem získal velikost energie, která je použita při rozjezdu vozidla. Pro zjištění celkové energie, které je zapotřebí při rozjezdu vozidla, jsem sečetl energii ze superkapacitorů s energií z troleje.

$$E_{celk} = E_{sc\_rozjezd} + E_{tr} \quad (16)$$

$$E_{celk} = E_{sc\_rozjezd} + E_{tr} = 2341,422 + 2653,649 = 4995,071 \text{ kJ}$$

Energie odebraná z troleje dosahuje hodnoty 2653,649 kJ. Superkapacitory se podílejí na rozjezdu 2341,422 kJ. Celková energie pro rozjezd je 4995,071 kJ. Pro lepší představení významu superkapacitorů jsem vše vyjádřil v procentech.

$$E_{celk} = 4995,071 \text{ kJ} = 100\%$$

$$E_{sc\_rozjezd} = 2341,422 \text{ kJ} = 46,87\%$$



## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

V režimu brzdy se energie vzniklá brzděním ukládá do superkapacitorů. Z naměřených dat jsem vypočítal, že energie naakumulovaná do první větve se superkapacitory je 1351,286 kJ. Energie naakumulovaná do druhé větve se superkapacitory je 1292,959 kJ.

Výsledné množství naakumulované energie je dáno vztahem:

$$E_{akum} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} \quad (17)$$

$$E_{sc\_rozjezd} = \sum_{i=1}^2 E_{capi} = E_{cap1} + E_{cap2} = 1351,286 + 1292,959 = 2644,245 \text{ kJ}$$

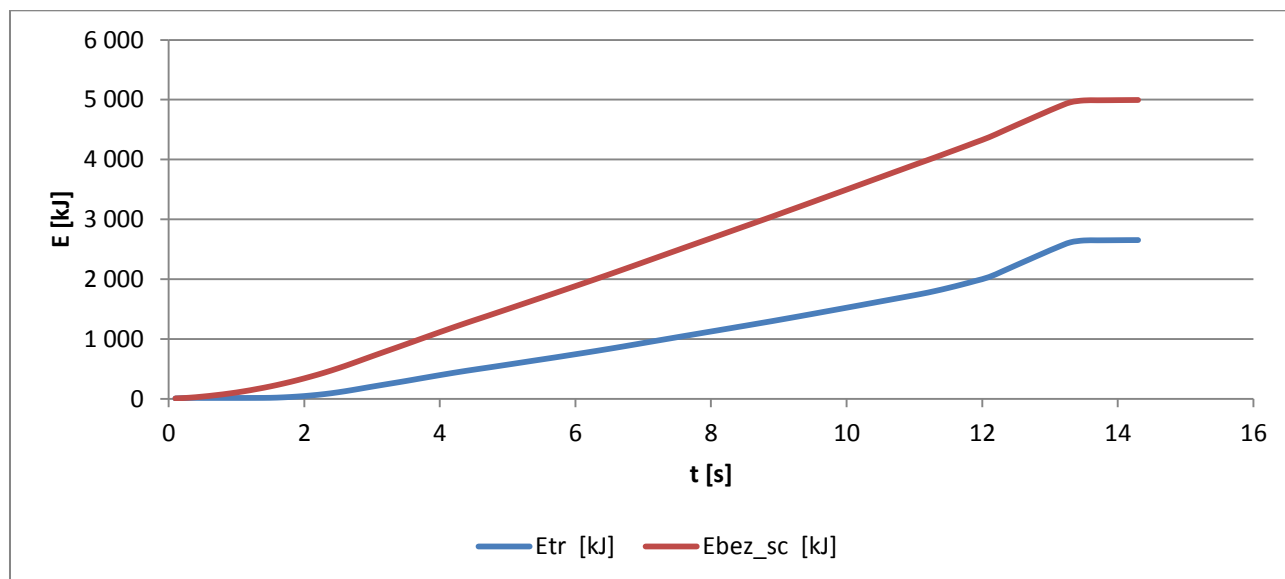
Během brzdění je energie, která se naakumuluje do superkapacitorů 2644,245 kJ. Pro lepší přehlednost jsem vypočítané hodnoty vyjádřil v procentech.

$$E_{celk} = 4995,071 \text{ kJ} = 100\%$$

$$E_{akum} = 2644,245 \text{ kJ} = 52,94\%$$

Z pohledu celkové energetické bilance, nasazením superkapacitorů je naakumulováno a následně využito 52,94 %. Většina této energie je použita pro rozjezd vozidla – 46,87 % a zbytek – 6,07 % spotřebují pomocné pohony. Na obrázku č. 20 jsou znázorněny grafy spotřeby energie při rozjezdu. Jedna křivka zobrazuje spotřebu elektrické energie při rozjezdu se superkapacitory a druhá křivka zobrazuje spotřebu elektrické energie bez použití superkapacitorů.

Obr. 21 porovnává spotřebovanou energii u vozidla vybaveným superkapacitory ( $E_{tr}$ ) s vozidlem bez superkapacitorů ( $E_{bez\_sc}$ ). Z grafu vyplývá, že u prázdného vozidla se superkapacitory je úspora energie kolem 50%.



Obr. 21: Průběh spotřebované energie se superkapacitory a bez superkapacitorů u prázdného trolejbusu

#### 4.3.10. Shrnutí energetické bilance vozidla se superkapacitory

V rámci diplomové práce jsem zpracoval velké množství dat z různých měření rozjezdů. Zde uvedené výsledky jsou vzorová ukázka, protože vyhodnocení ostatních rozjezdů dává prakticky stejné výsledky. V tabulce 10 je přehledně vyjádřena energetická bilance vozidla se superkapacitory, kterou jsem realizoval v rámci mé diplomové práce. Výsledky, ke kterým jsem se dopracoval, jsou podle mého pohledu reálné.

	$E_{celk}$ [kJ]	$E_{rozjezd}$ [kJ]	$E_{rozjezd}$ [%]	$E_{akum}$ [kJ]	$E_{akum}$ [%]	$E_{pp}$ [kJ]	$E_{pp}$ [%]
<b>Ložený</b>	5 781,071	1 734,617	30	1 920,771	33,23	186,729	3,23
<b>Prázdný</b>	4 995,071	2 341,422	46,87	2 644,245	52,94	303,008	6,07

Tabulka 10: Shrnutí energetické bilance vozidla

## 5. Závěr

Stále častější nasazování superkapacitorů jako akumulátorů elektrické energie má v současné době svůj opodstatněný význam. Jedná se o součástku, která je v posledních letech velice vyvíjenou a zdokonalovanou. Hlavním důvodem vývoje je potenciál, který v současné době superkapacity představují. Již dnes jsou parametry superkapacitorů natolik dostačující, že dochází k jejich hromadnému nasazování v různých průmyslových oblastech. Důvodem nasazování je velmi vysoká účinnost nabíjení, oproti klasickým akumulátorům, malý vnitřní odpor, podstatně vyšší měrný výkon na jednotku hmotnosti, velký teplotní rozsah, bezproblémová údržba a v neposlední řadě i životnost. Oproti tomu jejich nevýhodou je nižší hustota energie na jednotku hmotnosti, samovybíjení, nízké provozní jmenovité napětí a složitá výroba.

V diplomové práci jsem se především zabýval vyhodnocením dat naměřených na trolejbusu, který byl osazen moduly se superkapacity. Na tomto vozidle proběhly různé typové zkoušky, ze kterých jsem získal data v ASCII znacích. Vyhodnocením jsem zjistil, jaký přínos představuje nasazení superkapacitorů na vozidle, viz tabulka 8. V tabulce je udáno jakou měrou se podílí superkapacity na rozjezdu a následně kolik energie je naakumulováno do superkapacitorů během brzdění. Zásadním parametrem pro energetickou bilanci je hmotnost vozidla. U prázdného vozidla je přínos superkapacitorů více znatelnější než u vozidla loženého.

Nasazením superkapacitorů na vozidlo nedochází pouze k úspoře elektrické energie, ale také se zlepšuje dynamika rozjezdu vozidla. Dynamika jízdy je závislá na trolejovém napětí. Při poklesu napětí troleje dochází ke zhoršení dynamiky jízdy. Nasazením superkapacitorů je docíleno, že případné poklesy trolejového napětí jsou kompenzovány superkapacity a tím je zaručena lepší dynamika při rozjezdu. V trakční charakteristice vozidla se bod přechodu na výkonovou hyperbolu při sníženém napětí posouvá doleva přímo úměrně poměrem napětí.

## 6. Seznam použité literatury

[1] JENÍČEK, Jan. *Nabíjení a vybíjení superkapacitorů*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita.

[2] prezentace: 48550 Electrical Energy Technology, Supercapacitors, Prof. J.G.Zhu

[3] [Http://maxwell.com](http://maxwell.com) [online]. 2009 [cit. 2011-02-04]. Product guide. Dostupné z WWW: <[http://maxwell.com/docs/1014627\\_BOOSTCAP\\_PRODUCT\\_GUIDE.PDF](http://maxwell.com/docs/1014627_BOOSTCAP_PRODUCT_GUIDE.PDF)>.

[4] MAŠEK, Zdeněk, Stanislav GREGORA a Karel DVOŘÁK. *Superkapacity v dopravní technice*. Praha: Vědeckotechnický sborník ČD č. 25/2008, 2008.

[5] T, Černohorský. *Hybridní posunovací lokomotiva*. Pardubice, 2009. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.

[6] KRATSCHMER, Bruno. *Akumulace elektrické energie z OEZ*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT Brno.

[7] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003.

[8] Maxwell Technologies : BOOSTCAP® Ultracapacitors. [online]. 2009 [cit. 2011-03-12]. WWW:<[http://www.maxwell.com/docs/1014627\\_BOOSTCAP\\_PRODUCT\\_GUIDE.PDF](http://www.maxwell.com/docs/1014627_BOOSTCAP_PRODUCT_GUIDE.PDF)>.

[9] PANDOLFO, A.G. ; HOLLENKAMP, A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. [online]. 04.04.2006 [cit. 2011-03-27]. Dostupný z WWW: <[http://www.demar.eel.usp.br/electronica/artigos/Carbon\\_in\\_supercapacitors.pdf](http://www.demar.eel.usp.br/electronica/artigos/Carbon_in_supercapacitors.pdf)>.

[10] Superkapacity. *Maxwell Technologies* [online]. [cit. 2011-02-27]. Dostupný z WWW: <[http://www.ecomcz.eu/novinky/maxwell\\_user\\_manual.pdf](http://www.ecomcz.eu/novinky/maxwell_user_manual.pdf)>.

[11] Superkondenzátory : Elektrochemické kondenzátory. *Princip uchování el. naboje v elektrochemických kondenzátorech* [online]. 16. 08. 2010 [cit. 2011-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory>>.

[12] 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/supercapacitory%20maxwell.pdf>

## Použití superkapacitorů na vozidlech MHD

[13] Stop – start systém. *Maxwell Technologies* [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/industries/transportation.aspx>>.

[14] [Http://nesscap.com](http://nesscap.com) [online]. 2009 [cit. 2011-02-07]. Review of Ultracapacitor Technologies for Vehicle Applications. Dostupné z WWW: <[http://nesscap.com/data\\_nesscap/Prof%20Burke-AABC%202001.PDF](http://nesscap.com/data_nesscap/Prof%20Burke-AABC%202001.PDF)>.

[15] Maxwell Backup Power. *Maxwell Technologies* [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. WWW: <[http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/applications/backup\\_power.aspx](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/applications/backup_power.aspx)>.

[16] [Http://tf.llu.lv](http://tf.llu.lv) [online]. 2008 [cit. 2011-02-16]. THE APPLICATION OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DEVICES IN DC DRIVE. Dostupné z WWW: <[http://tf.llu.lv/conference/proceedings2008/Papers/14\\_Brazis.pdf](http://tf.llu.lv/conference/proceedings2008/Papers/14_Brazis.pdf)>.

[17] [Http://tf.llu.lv](http://tf.llu.lv) [online]. 2009 [cit. 2011-02-22]. APPLICATION OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DEVICES IN INDUCTION DRIVES. Dostupné z WWW: <[http://tf.llu.lv/conference/proceedings2009/Papers/58\\_Viesturs\\_Brazis.pdf](http://tf.llu.lv/conference/proceedings2009/Papers/58_Viesturs_Brazis.pdf)>.

[18] [Http://www.sumobrain.com](http://www.sumobrain.com) [online]. 2007 [cit. 2011-04-09]. Wind turbine system with AC servo motor rotor blade pitch control, using supercapacitor energy storage. Dostupné z WWW: <<http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Wind-turbine-system-withac/WO2007132303A1.pdf>>.

[19] Superkondenzátor – princip, vlastnosti, použití. *Automatizace.hw.cz : rady a poslední novinky z oboru* [online]. 26.12.2006 [cit. 2011-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>>.

