

Jiří Fořt, Pavel Drábek

## **Modulární systém akumulace energie – simulace regulačních algoritmů a oživení měřicího standu**

Technická zpráva

Pracovní balíček:

**WP8 – Elektrické části pohonů, hybridní pohony, rekuperace**

Rok řešení:

**2017**

**Pracoviště:** Regionální inovační centrum elektrotechniky  
Západočeská univerzita  
Fakulta elektrotechnická

**Výzkumná zpráva č.:** 22190 - 057 - 2017

# *Modulární systém akumulace energie – simulace regulačních algoritmů a oživení měřicího standu*

**Druh úkolu:** Vědecko-výzkumný  
**Řešitelé:** Ing. Jiří Fořt, Ph.D., Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.  
**Vedoucí úkolu:** Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
**Počet stran:** 17  
**Datum vydání:** prosinec 2017  
**Revize:** 1

Tato práce vznikla s podporou projektu TA ČR TE01020038

## Anotace

Zpráva se zabývá experimentálním standem ESS systému plného výkonu sestávajícím se ze dvou super-kapacitorů MAXWELL a dvou super-kapacitorů LSMtron. V první fázi se sestavil matematický model systému pro nastavení regulačních algoritmů. Následně byl oživen experimentální stand ESS a byly aplikovány algoritmy do řídicího systému a odměřeny základní parametry superkapacitorů.

## Seznam symbolů a zkratk

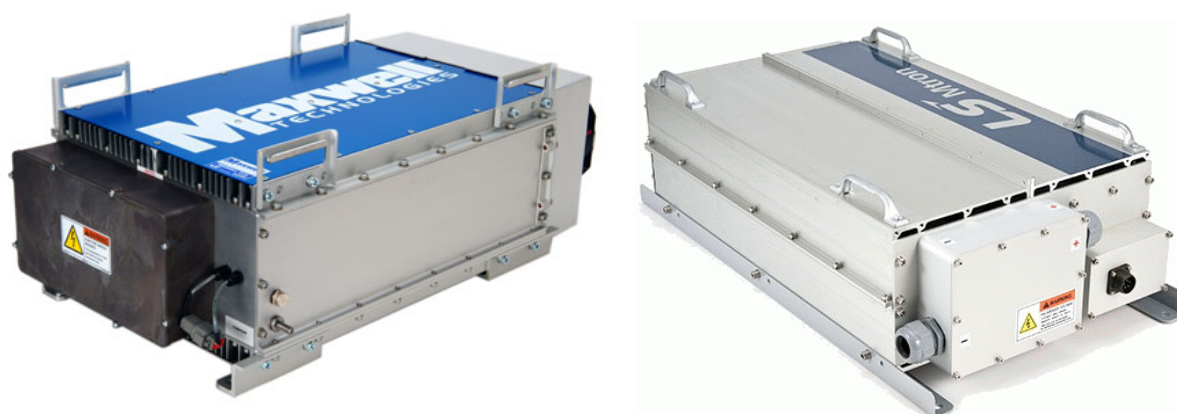
ESS	Energy storage systém / systém akumulace energie
ESR	Ekvivalentní sériový odpor
SC	super-kondenzátor / super-kapacitor

## Obsah

1 ÚVOD.....	4
2 ZAPOJENÍ SILOVÝCH OBVODŮ ESS SYSTÉMŮ.....	4
3 MATEMATICKÝ MODEL SYSTÉMU ESS .....	6
4 ZÁVĚR.....	14

## 1 Úvod

Topologie výkonových obvodů uvažovaného ESS je navržena jako modulární systém, který je sestaven ze sériově spojených 2 superkapacitorů BMOD0063 P125 B08 od firmy MAXWELL (125V/63F) a sériovém spojení 2 superkapacitorů LSUM 129R6C 0062F EA od firmy LS Mtron (129V/62,5F) viz obr. 1.1. Podle potřeby je možné libovolně měnit sério-paralelní řazení všech 4 akumulčních článků modulárního systému a hospodařit tak s celkovou uložitelnou energií cca 570Wh. Experimentální stand ESS plného výkonu bude sloužit pro testování jednoho modulu od každého výrobce a následné porovnání parametrů. Dále bude sloužit pro připojení sério-paralelní kombinace 4 SC k trakčnímu pohonu pro ukládání energie a testování řídicích algoritmů power managementu vozidla využívajících ESS plného výkonu.



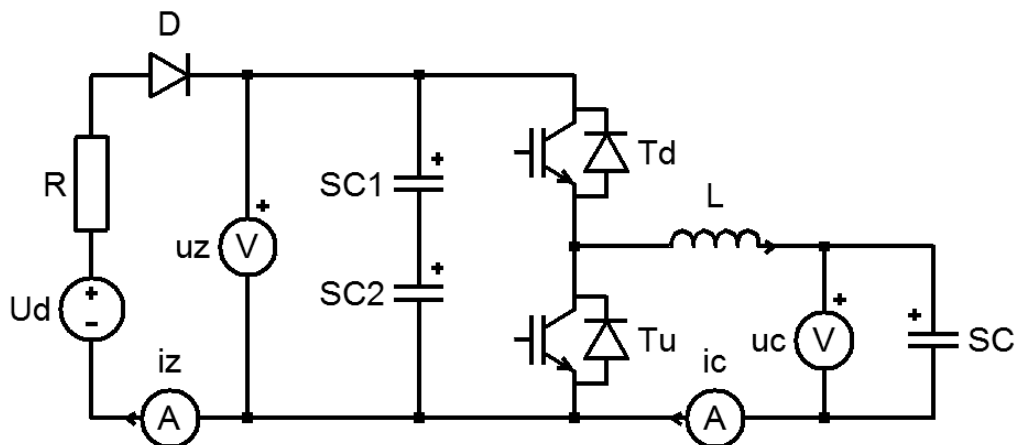
Obr. 1.1: Superkondenzátorové moduly

Vlevo: Maxwell - BMOD0063 P125 B08 (125V/63F)

Vpravo: LS Mtron - LSUM 129R6C 0062F EA (129V/62,5F)

## 2 Zapojení silových obvodů ESS systémů

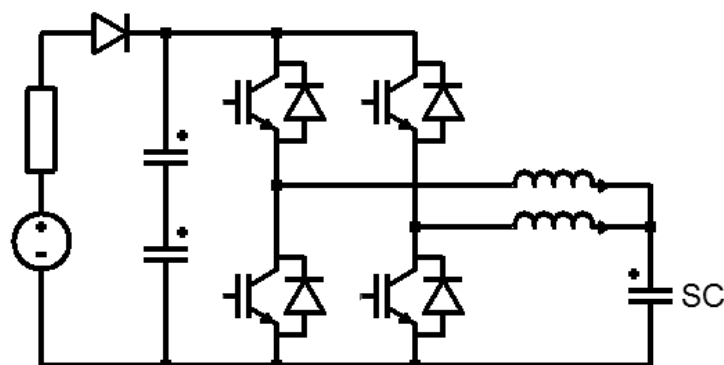
Základní zapojení silového obvodu pro ověřování parametrů super-kapacitorů je uvedeno na následující obrázku. Kondenzátory  $SC_1$  a  $SC_2$  (stejného výrobce) tvoří zdroj pro dvoukvadrantový pulzní měnič s reverzací proudu, který pracuje jako pulzní měnič pro snižování napětí (spínáním tranzistoru  $T_d$ ), v případě dodávky energie směrem do měřeného superkapacitoru  $SC$ , nebo jako pulzní měnič pro zvyšování napětí (spínáním tranzistoru  $T_u$ ) v situaci, kdy potřebujeme energii z měřeného kondenzátoru  $SC$  naopak odebrat.



Obr. 2.1: Semikron – výkonový měnič - SKiiP 613 GD123-3DUL V3

Jelikož pracujeme se s různými hladinami napájecího napětí zdroje  $u_z$  a napětí  $u_c$  na měřeném super-kondenzátoru  $SC$ , je nezbytné vložení indukčnosti  $L$ , která jednak omezí vyrovnávací proud  $i_c$  (nabíjecí nebo vybíjecí proud  $SC$ ) a dále umožní jeho regulaci na požadovanou hodnotu. Doplnění základního silového obvodu o zdroj stejnosměrného napětí  $U_d$  spolu s nastavitelným odporem  $R$  a diodou  $D$  slouží pro velmi jednoduché krytí elektrických ztrát ve vlastním měřicím obvodu, tak aby bylo možné provádět také dlouhodobější měření (stanovený počet nabíjecí a vybíjecích cyklů s daným proudem).

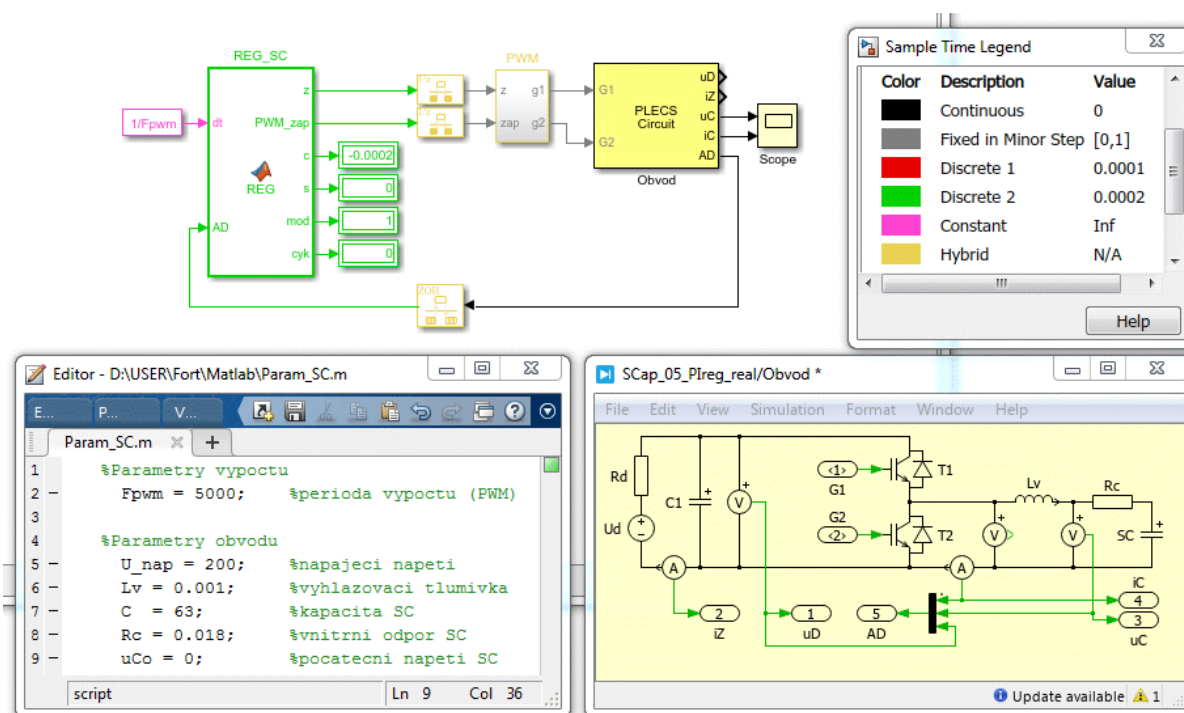
Zapojení měničů Skiip ve vícefázové topologii pulzních měničů je předpokládáno při testování provozu super-kapacitorů v pulzním režimu s vyššími proudy pro rozložení proudu a omezení ztrát IGBT spínačů, jak je naznačeno na následujícím obrázku. Výhodou je zde také možnost využití tzv. přesazeného řízení, které vede na vyšší frekvenci měřicího proudu a zmenšení zvlnění proudu, napájecího měřený super-kapacitor  $SC$ .



Obr. 2.2: Vícefázové (na obr. dvoufázové) zapojení výkonového měniče

### 3 Matematický model systému ESS

V roce 2017 jsme pokračovali v řešení problematiky ESS a zaměřili jsme se na oživení standu ESS plného výkonu postaveného v roce 2016 a zahájení testů parametrů superkondenzátorů. V první fázi jsme sestavili matematický model ESS systému pro odladění regulačních algoritmů. Simulační model v okamžitých hodnotách je vytvořen v prostředí Matlab / Simulink R2015b. V simulaci je hojně využíván blok Matlab Function, ve kterém jsou vytvořeny hlavní i vedlejší funkce formou kódu, který je následně snadno přenositelný do řídicího systému (např. DSP jednotky). Výkonový obvod je modelován v prostředí Simulink/Plecs. Tato koncepce kombinuje přehlednost prostředí Matlab / Simulink s výhodami simulace psané v kódu. Přehlednost je dále navýšena členěním simulace do subsystémů a bloků, tak, jak je naznačeno na uvedeném blokovém schématu na obr. 3.1. Základní zapojení silového obvodu pro ověřování parametrů superkapacitorů je znázorněno vpravo dole.

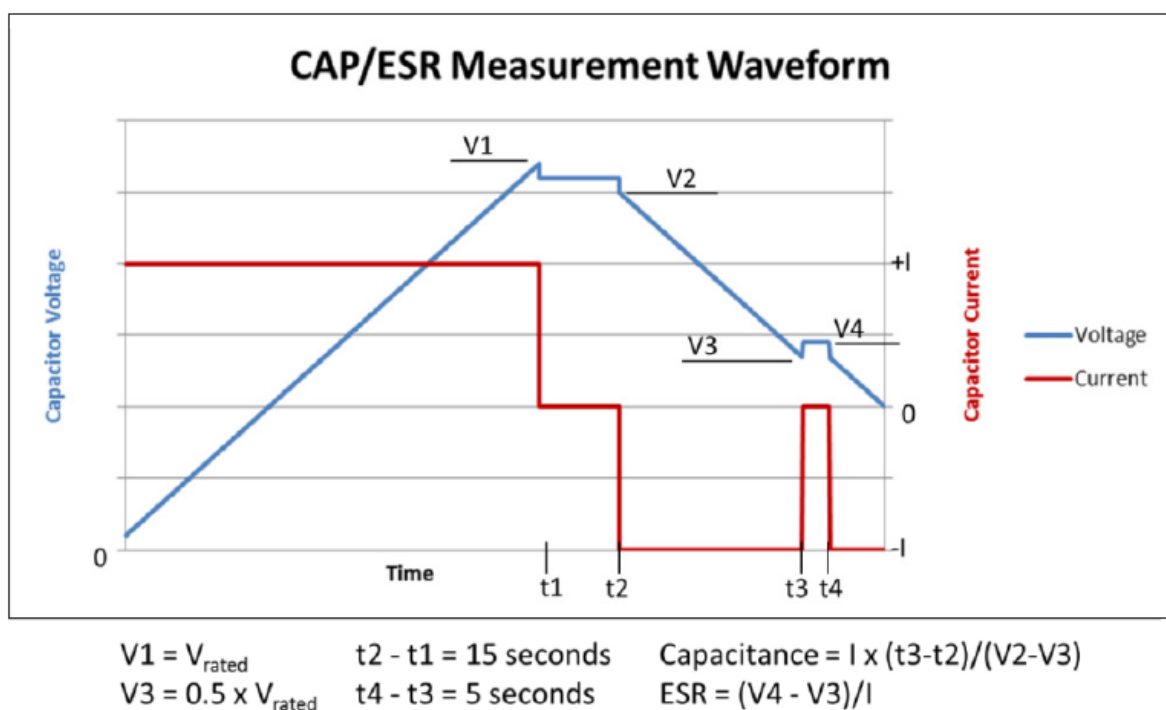


Obr. 3.1: Simulační model ESS v Matlabu s využitím

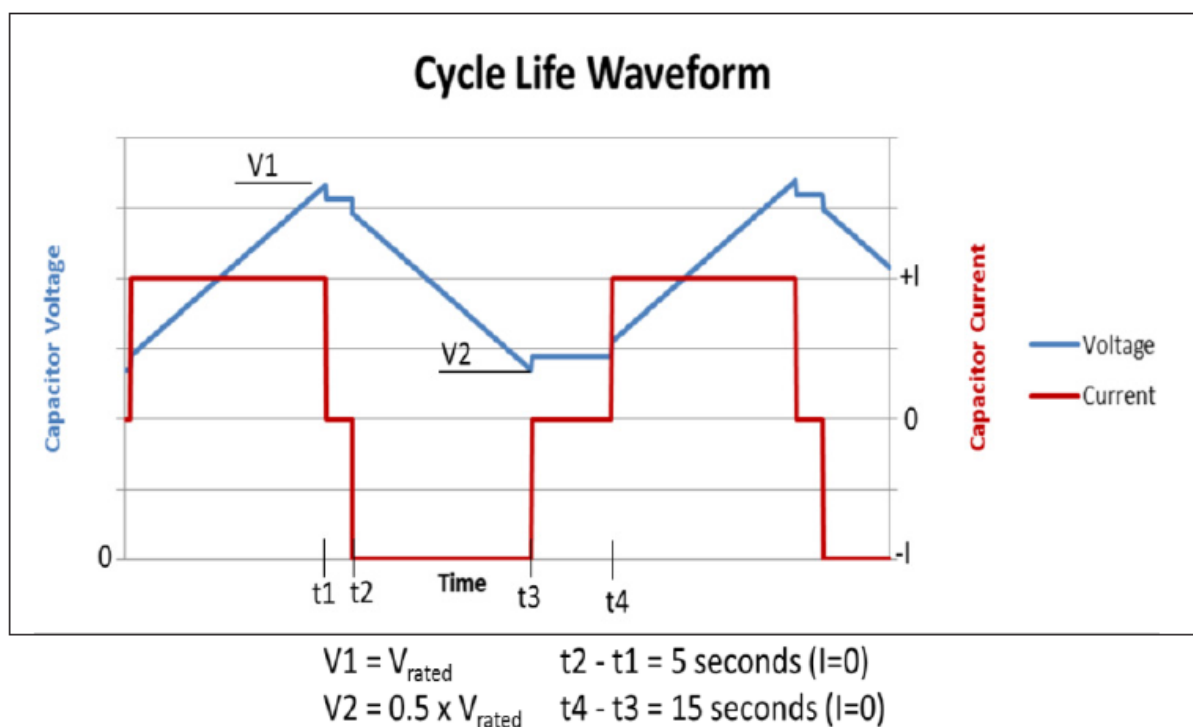
Hlavní parametry, které chceme testovat na zmiňovaných superkapacitorech, jsou: kapacita, ekvivalentní sériový odpor ESR a životnost superkapacitorů. Měření parametrů provedeme



dle doporučení výrobce viz např. doporučení firmy MAXWELL (obr. 3.2 a 3.3). Na obr. 3.2 je znázorněn doporučený průběh pro měření kapacity a ESR superkondenzátoru, kde jsou uvedeny vztahy pro výpočet kapacity a ESR a graficky znázorněny veličiny, které je nutné odečíst z průběhu, doporučená velikost proudu je 100A. Doporučený průběh pro testování životnosti kondenzátoru je na obr. 3.3, kterým se nechá testovaný superkondenzátor zatěžovat a poté se změří změna kapacity a ESR, se stárnutím superkondenzátoru dochází k poklesu kapacity a nárůstu ESR. Životnost superkapacitoru BMOD0063 P125 B08 od firmy MAXWELL je definována na 1 000 000 cyklů (cyklus je definován od 100% do 50% jmenovitého napětí) při poklesu kapacity o 20% a nárůstu ESR o 100%.

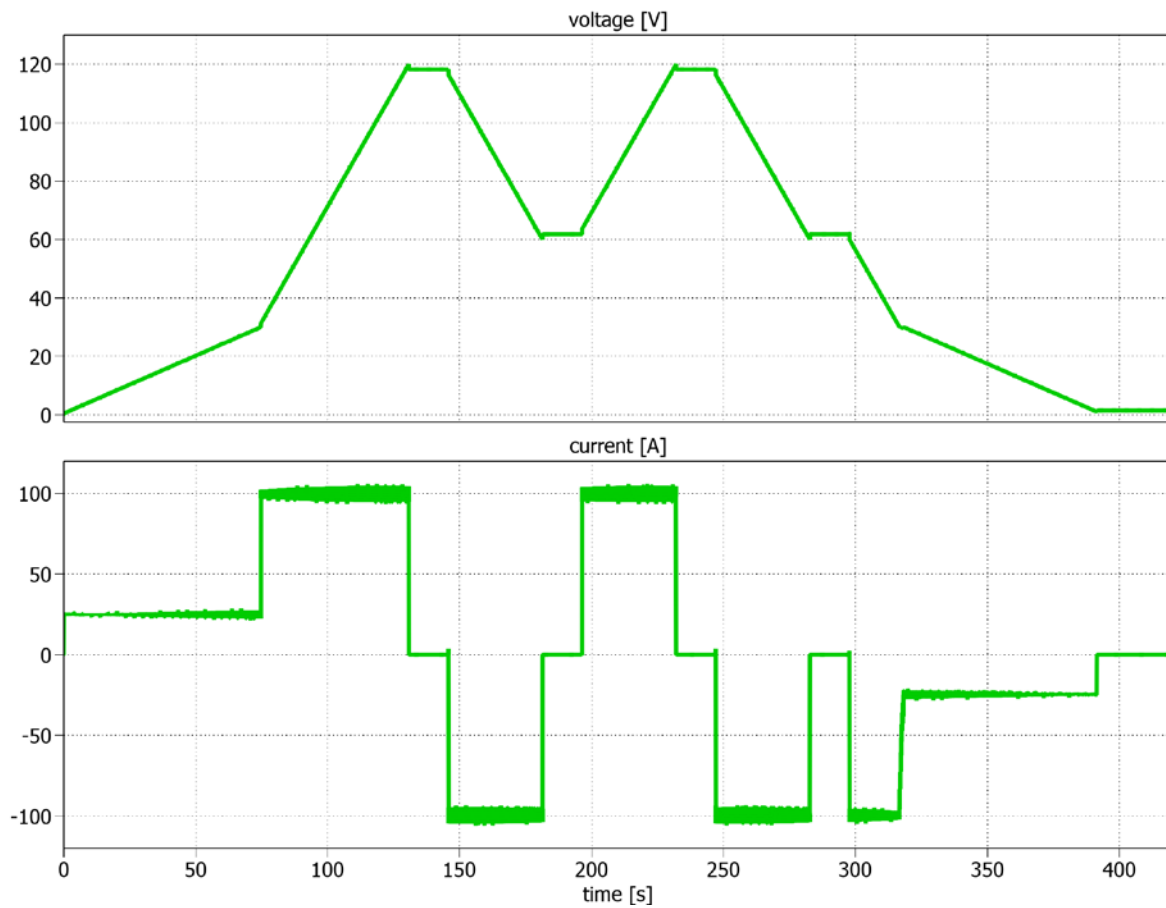


Obr. 3.2: Doporučený profil zatěžování superkapacitoru pro měření kapacity a ESR

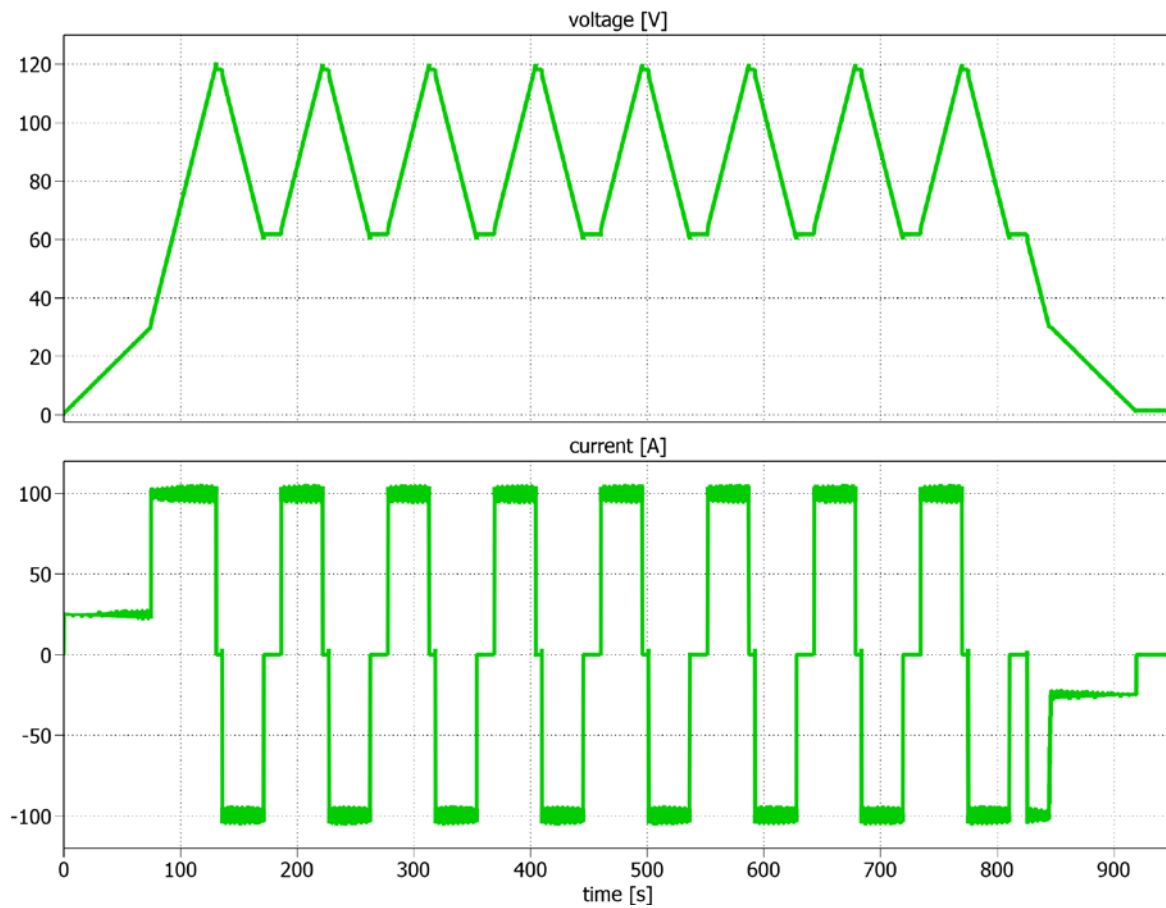


Obr. 3.3: Doporučený profil zatěžování superkapacitoru pro měření životnost

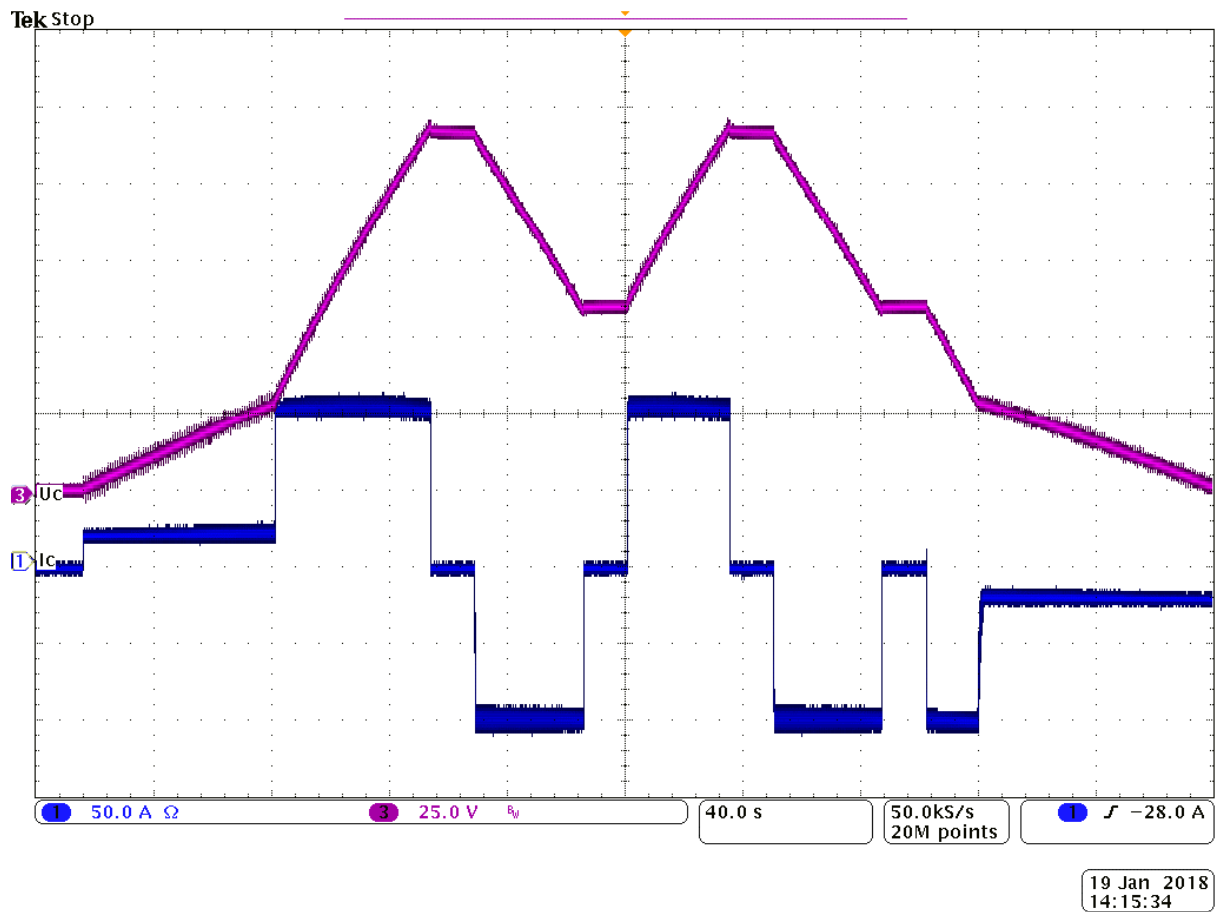
Pomocí simulačního modelu ESS jsme si odladili regulační algoritmy pro doporučené profily zatěžování výrobcem (obr. 3.4 a 3.5). Následně jsme aplikovali části kódů regulačních algoritmů do řídicí jednotky DSP experimentálního standu ESS a odměřili dané profily (obr. 3.6 a 3.7). Na změřených průbězích z osciloskopu je patrné velké zvlnění proudu kapacitorem a bohužel i velké zvlnění napětí na kapacitoru měřené přímo na svorkách kapacitoru, které velmi ztěžuje odečítání velikosti napětí pro výpočet kapacity a ESR. Velké zvlnění napětí je nejspíše dáno vnitřní parazitní indukčností přívodů a rušením měřících sond osciloskopu. Pro vyhlazení průběhu napětí je možné použít různé filtrace (softwarově či hardwarově), ale je zde nebezpečí zkreslení výsledků od rušení. Proto jsme využili vlastního měřicího systému kapacitoru MAXWELL, který měří některé vybrané veličiny (napětí celkové a na jednotlivých člancích, teplotu atd.) a posílá informace po sběrnici CAN (průběhy na obr. 3.8 a 3.9 – zde jsou zobrazeny pouze napětí a teplota, proud superkapacitoru se přes CAN sběrnici neměří). Experimentální stand ESS systému, na kterém probíhalo měření, je zobrazeno na obr. 3.10.



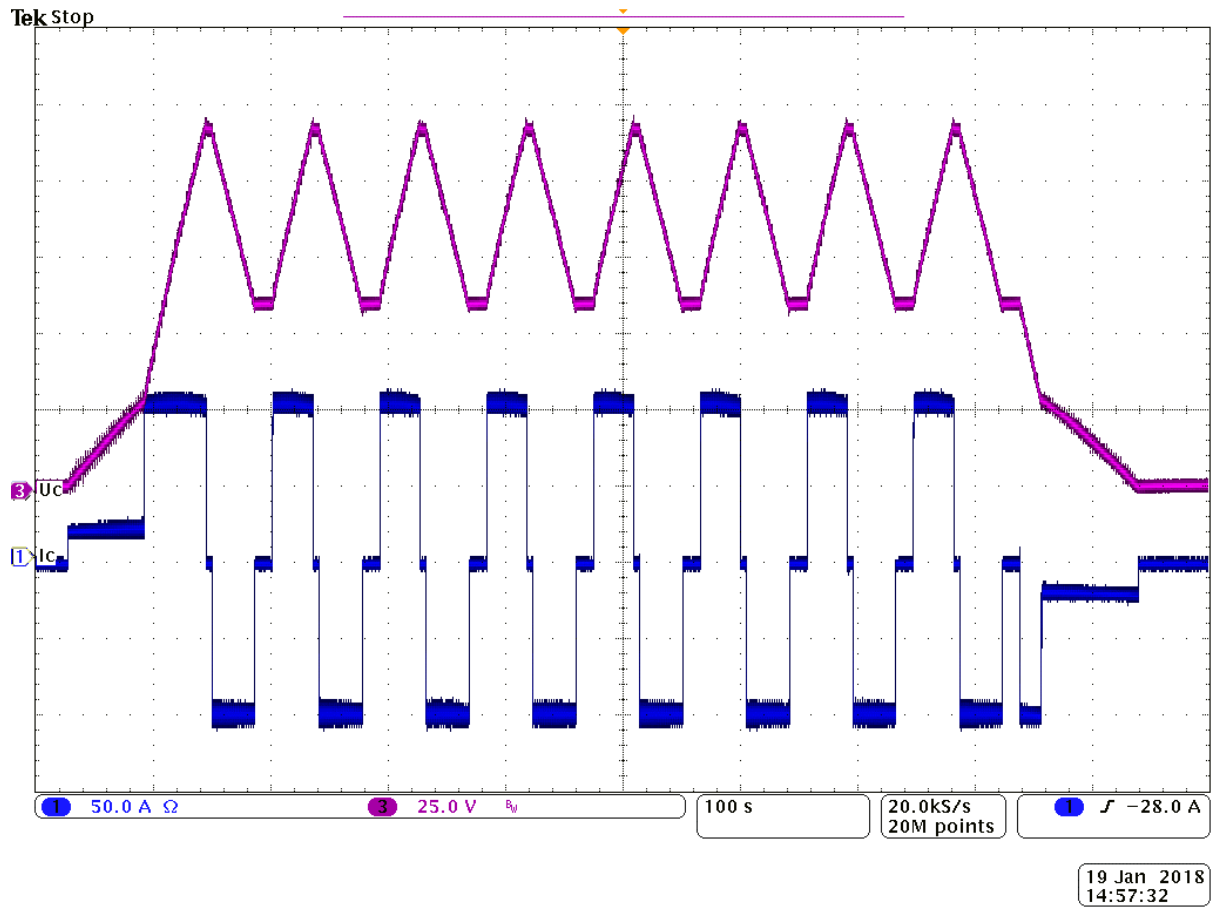
Obr. 3.4: Simulace profilu zatěžování superkapacitoru pro měření kapacity a ESR



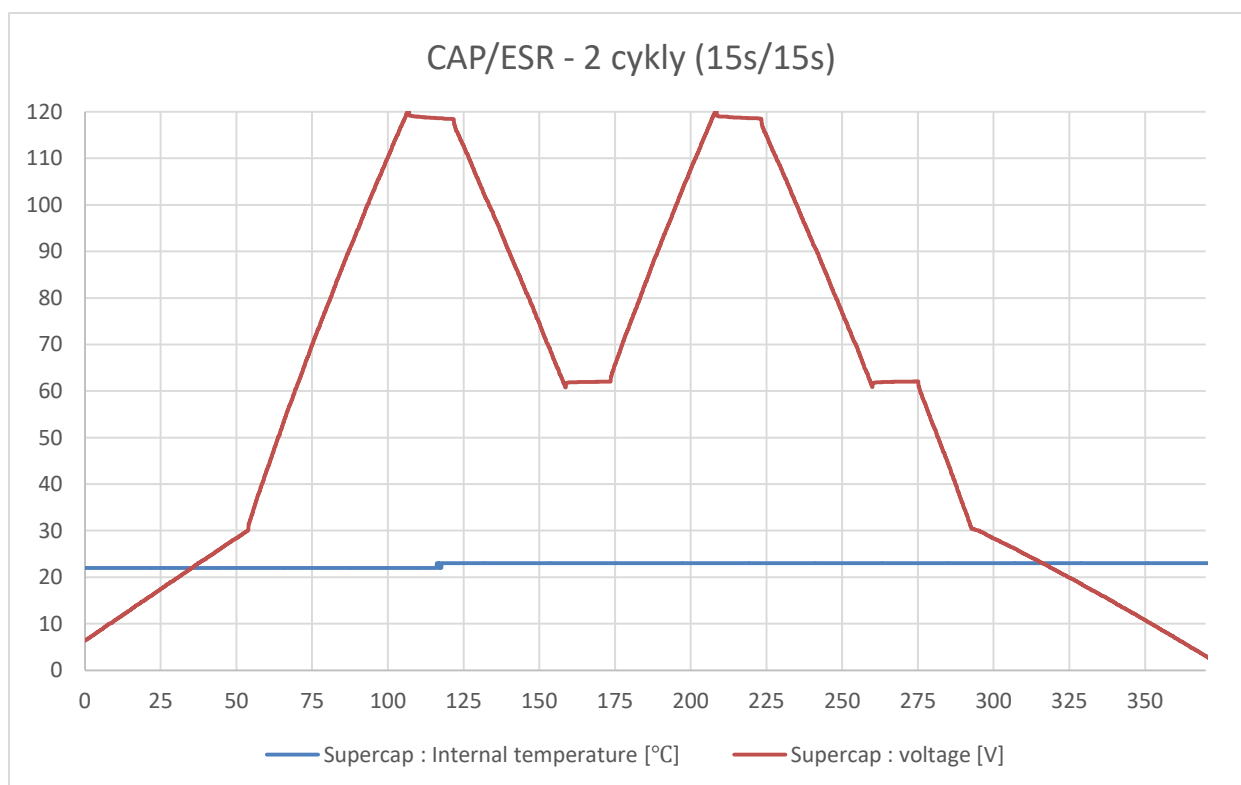
*Obr. 3.5: Simulace profilu zatěžování superkapacitoru pro měření životnosti*



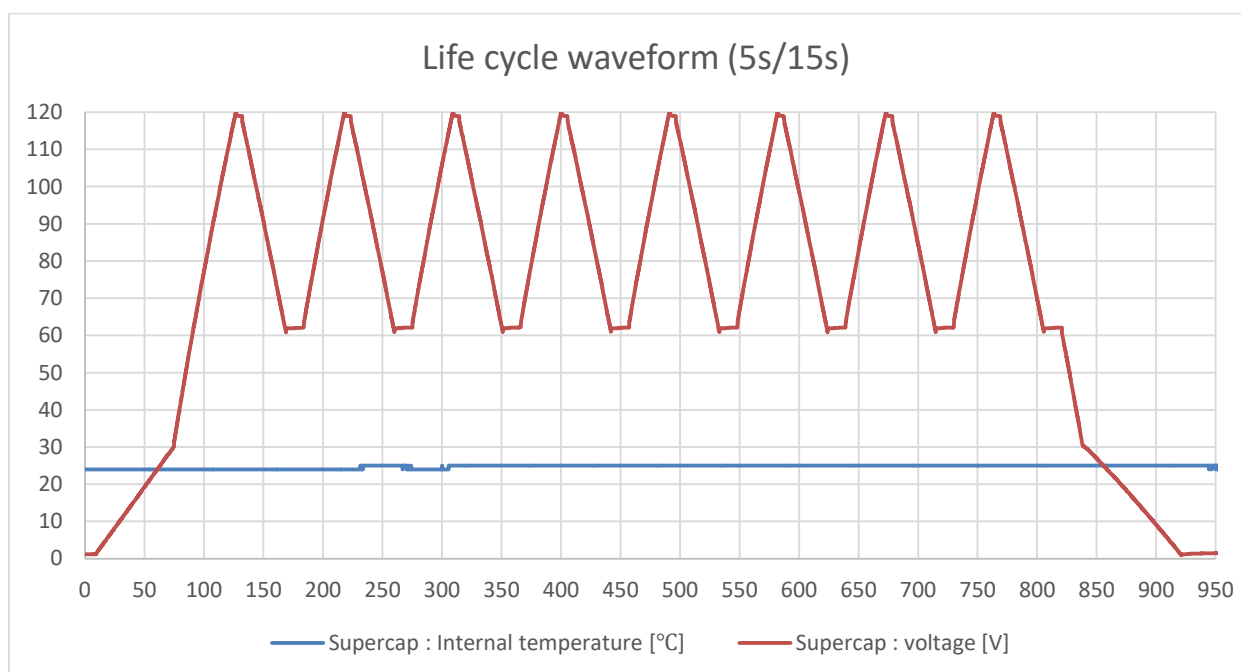
Obr. 3.6: Měření profilu zatěžování superkapacitoru pro měření kapacity a ESR



Obr. 3.7: Měření profilu zatěžování superkapacitoru pro měření životnosti



*Obr. 3.8: Měření profilu zatěžování superkapacitoru pro měření kapacity a ESR – data měřená přes CAN sběrnici*



*Obr. 3.9: Měření profilu zatěžování superkapacitoru pro měření životnosti – data měřená přes CAN sběrnici*



*Obr. 3.10: Experimentální stand ESS systému sestávající se ze superkapacitorů MAXWELL a LSMtron*

## 4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývá experimentálním standem ESS systému plného výkonu sestávajícím se ze dvou super-kapacitorů MAXWELL a dvou super-kapacitorů LSMtron. Nejdříve se sestavil matematický model systému pro nastavení regulačních algoritmů. Následně byl oživen experimentální stand ESS a byly aplikovány algoritmy do řídicího systému pro odměření základních parametrů superkapacitorů. Mezi nejdůležitější parametry patří kapacita, ekvivalentní sériový odpor ESR a životnost superkapacitoru. Měření se provádí dle doporučených měřících profilů (viz obr. 3.2 a 3.3). Uvedené profily byly odsimulovány a následně experimentálně ověřeny. Z uvedených průběhů je patrné, že regulační algoritmy jsou dobře nastaveny a měřící cykly odpovídají doporučeným průběhům. Zobrazená teplota superkapacitoru se téměř neměnila, což je však způsobeno hlavně krátkým časovým intervalem a menším zatěžovacím proudem.

Sestavený experimentální stand je plně funkční a v roce 2018 budou následovat kompletní testy obou typů superkapacitorů a porovnány provozní parametry obou typů. Zásadní bude testování superkapacitorů při jmenovitých provozních stavech (cca 150A a 250 A dle



dovoleného oteplení superkapacitorů) a dále při krátkodobém pulsním přetěžování (750A po dobu 1s při pulsním provozu 10%).

## Literatura

[1] [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com)

[2] [www.msltron.com](http://www.msltron.com)

