

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

**Disertační práce**

Metody odhadu stavu nabití Li-Ion akumulátorů

**vedoucí práce:** Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.  
**konzultant specialista:** Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.  
**autor:** Ing. Petr Křibský

**2016**

## **Anotace**

Tato práce se zabývá problematikou odhadu stavu nabití akumulátorů lithium ion. Práce obsahuje popis základních principů odhadu stavu nabití akumulátorů. V práci je dále obsažen návrh netradičního způsobu odhadu stavu nabití aplikovatelný na levné akumulátory s méně přesným měřením napětí a proudu. Všechny způsoby odhadu jsou otestovány za různých klimatických a provozních stavů na velkém množství sériově vyráběných akumulátorů určených pro využití ve dvou odlišných aplikacích. Práce obsahuje i zhodnocení úspěšnosti všech zmíněných metod.

## **Klíčová slova**

Akumulátor, kapacita, Li-Ion, lithiový článek, mikroprocesor, nabíjení, OCV, odhad, SOC, stav nabití, vybíjení

## **Abstract**

This thesis deals with methods for an estimation of state of charge of lithium ion batteries. This work contains a description of the basic principles of estimation the state of charge. The paper also includes a proposal of an unconventional method for estimation of state of charge. This method is designed for low cost electronics with not so accurate voltage and current measurement systems. All methods of estimation were tested under various climatic and operating conditions on a large amount of mass-produced batteries intended for use in two different applications. The work also includes an evaluation of the success of these methods.

## **Keywords**

Accumulator, capacity, discharging, estimation, charging, Li-Ion, lithium cell, microcontroller, OCV, SOC, state of charge,

## Seznam použitých zkratek a symbolů

AD	Analogově digitální (Analog to digital)
ADC	Převodník mezi analogovým a digitálním signálem (Analog to digital converter)
BIR	Vnitřní odpor baterie (Battery Internal Resistance)
BMS	Řídicí systém akumulátoru (Battery Management System)
CC	Metoda nabíjení akumulátoru konstantním proudem (Constant Current)
CCM	Metoda integrace proudu (Coulomb Counting method)
CV	Metoda ukončení nabíjecího procesu akumulátoru konstantním napětím (Constant Voltage)
FFC	Plochý ohebný kabel (Flat Flexible Cable)
FPU	Jednotka pro výpočty s plovoucí řádovou čárkou (Floating Point Unit)
IC	Označení integrovaného obvodu (Integrated circuit)
LiFePO <sub>4</sub>	Elektro-chemický článek typu lithium-železo-fosfát
Li-Ion	Elektro-chemický článek typu lithium-iont
Li-Pol	Elektro-chemický článek typu lithium-polymer
MCU	Řídicí jednotka (Microcontroller unit)
MOCV	Modifikovaná metoda bezproudého napětí článku (Modified Open Circuit Voltage)
MOS-FET	Tranzistor řízený elektrickým polem (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)
NiCd	Elektro-chemický článek typu nikl-cadmium
NiMH	Elektro-chemický článek typu nikl-metal-hydrid
nSmP	Označení počtu sériově a paralelně řazených článků v akumulátoru
NTC	Teplotní sensor s negativním koeficientem (Negative temperature coefficient thermistor)

OCV	Bezpróudé napětí článku (Open Circuit Voltage)
OZ	Operační zesilovač (Operating amplifier)
R	Elektrický odpor (Resistor)
S	Spínač
SBD	Specifikace parametrů akumulátorů (Smart Battery Data Specification)
SMBus	Sběrnice navržená pro komunikaci mezi akumulátorem, zátěží a nabíječkou (System management Bus)
SOA	Bezpečná operační oblast tranzistoru (Safe Operation Area)

## Seznam veličin

C	[F]	Kapacita
I	[A]	Elektrický proud
$I_0$	[A]	Saturační proud diodou v závěrném směru
m	[-]	Počet článků v paralelním řazení
n	[-]	Počet článků v sériovém řazení
P	[W]	Výkon
$P_Z$	[W]	Výkonová ztráta
Q	[C]	Elektrický náboj
R	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$R_{DC}$	[ $\Omega$ ]	Stejnoseměrný vnitřní odpor článku
$R_{IN}$	[ $\Omega$ ]	Vnitřní odpor článku
SOC	[%]	Relativní stav nabití akumulátoru (State of Charge)
T	[ $^{\circ}C$ ]	Teplota
t	[s]	Čas
U	[V]	Elektrické napětí
$U_0$	[V]	Bezproude napětí článku
$U_I$	[V]	Napětí zatíženého článku
$\eta$	[%]	Účinnost

## Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 06.10.2016

Petr Kříbský

.....

## Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád upřímně poděkoval svému školiteli doc. Jiřímu Skálovi, Ph.D. a konzultantovi specialistovi Ing. Kamilu Kosturikovi, Ph.D. za velmi cenné připomínky, rady a vedení této práce.

Mé díky patří i všem mým kolegům, spolupracovníkům a kamarádům, kteří mi byli nápomocni pokaždé, když jsem je žádal o radu.



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
1.1	Cíl disertační práce.....	15
1.2	Současný stav problematiky .....	15
<b>2</b>	<b>ELEKTROCHEMICKÝ AKUMULÁTOR</b> .....	<b>17</b>
2.1	Lithiový článek typu lithium iont .....	17
2.2	Lithiový článek typu Lithium železo fosfát.....	17
2.3	Lithiový článek typu lithium polymer.....	17
<b>3</b>	<b>ZÁKLADNÍ BLOKY ELEKTRONIKY</b> .....	<b>18</b>
3.1	Blok měření teplot.....	18
3.1.1	Měření teploty článků.....	18
3.1.2	Měření teploty výkonových spínacích prvků .....	19
3.2	Blok měření napětí článků .....	19
3.3	Budiče pro výkonové spínací tranzistory .....	19
3.4	Blok pro měření proudu.....	20
<b>4</b>	<b>PARAMETRY ČLÁNKŮ</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>VNITŘNÍ PARAMETRY ČLÁNKU</b> .....	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>METODY ODHADU ZBYTKOVÉ KAPACITY ČLÁNKŮ</b> .....	<b>23</b>
6.1	Metoda integrace proudu tekoucího z (do) článku .....	23
6.2	Metoda napětí článku na prázdko.....	25
6.3	Metoda založená na měření změny vnitřního odporu článku .....	25
6.4	Kombinace zmíněných metod.....	26
6.5	Vlastní navržená metoda odhadu stavu nabití lithiových článků.....	27
<b>7</b>	<b>TESTY METOD PRO ODHAD STAVU NABITÍ AKUMULÁTORU</b> .....	<b>30</b>
7.1	Popis testovacího vybavení.....	30
7.2	Popis testovacích sekvencí.....	32
7.2.1	Testovací sekvence pro akumulátor do záchranného zařízení Lukas .....	32
7.2.2	Testovací sekvence pro akumulátor do elektro-kole značky Electrolyte a typu Vohrradler ....	35
7.3	Výchozí podmínky pro testování metod odhadu stavu nabití.....	39
7.3.1	Počáteční podmínky pro akumulátory v testu .....	40
7.3.2	Klimatické podmínky v průběhu testu .....	41
7.4	Průběhy testů akumulátorů .....	41
<b>8</b>	<b>POSTUP PŘI HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TESTŮ METOD ODHADU STAVY NABITÍ AKUMULÁTORŮ</b> .....	<b>43</b>
8.1	Zhodnocení výsledků akumulátorů do zařízení Lukas StrongArm .....	43
8.1.1	Metoda odhadu stavu nabití založeného na měření napětí nezatíženého článku .....	43
8.1.2	Metoda odhadu stavu nabití založená na sledování změny vnitřního odporu článků.....	45
8.1.3	Metoda odhadu stavu nabití pomocí integrace proudu.....	48
8.1.4	Příprava nově navržené metody odhadu stavu nabití z napětí zatíženého článku .....	55
8.1.5	Kombinace metod odhadu stavu nabití z napětí článku a integrace proudu.....	68
8.2	Zhodnocení výsledků akumulátorů do elektro-kolo ElectroLyte Vohrradler.....	74
8.2.1	Metoda odhadu stavu nabití založeného na měření napětí nezatíženého článku .....	74
8.2.2	Metoda odhadu stavu nabití pomocí integrace proudu.....	74
8.2.3	Metoda odhadu stavu nabití založená na sledování změny vnitřního odporu článků.....	76
8.2.4	Příprava nově navržené metody odhadu stavu nabití z napětí zatíženého článku .....	76
8.2.5	Kombinace metod odhadu stavu nabití z napětí článku a integrace proudu.....	78
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>79</b>
9.1	Shrnutí dosažených výsledků.....	79
9.2	Zhodnocení jednotlivých metod odhadu pro akumulátoru do záchranného zařízení Lukas	79

9.3	Zhodnocení jednotlivých metod odhadu pro akumulátor do elektro-kola Electrolyte.....	81
9.4	Slabiny využití elektronik pro ochrany lithiových akumulátorů.....	82
9.5	Směrování dalšího vývoje.....	82
	<b>POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ .....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKOVANÝCH PRACÍ .....</b>	<b>87</b>
	<b>FUNKČNÍ VZORKY .....</b>	<b>89</b>
	<b>VÝČET PEDAGOGICKÉ A VĚDECKÉ ČINNOSTI AUTORA .....</b>	<b>90</b>
	<b>VÝČET ODBORNÉ NEPEDAGOGICKÉ ČINNOSTI AUTORA .....</b>	<b>91</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1.	Blokové schéma elektroniky pro ochranu Li-Ion článků .....	18
Obr. 2.	Zapojení tranzistorů v akumulátoru a) bez komunikace b) s komunikací .....	20
Obr. 3.	Zjednodušený model článku .....	28
Obr. 4.	Blokové schéma testovacího systému .....	30
Obr. 5.	Reálné měřicí pracoviště .....	31
Obr. 6.	Aplikace BatMon pro příjem a zobrazení údajů z BMS .....	32
Obr. 7.	Záchranné zařízení pro hasiče Lukas StrongArm [11].....	33
Obr. 8.	Průběh pracovního cyklu rozšířený o průběh spotřebované kapacity.....	34
Obr. 9.	Elektro-kolo Electrolyte Vohradler [12].....	36
Obr. 10.	Displej elektro-kola Electrolyte Vohradler [13] .....	37
Obr. 11.	Trasa pro získání testovacího profilu .....	38
Obr. 12.	Výškový a proudový profil testovací trasy .....	39
Obr. 13.	Odhad klidové hodnoty SOC pomocí standardní metody OCV, .....	43
Obr. 14.	Průběh relativní chyby odhadu SOC pomocí metody OCV pro akumulátor v klidovém stavu.....	44
Obr. 15.	Průběh odhadu pomocí standardní metody OCV na testovacích sekvencích Lukas StrongArm .....	45
Obr. 16.	Závislost vnitřního odporu článku na jeho stavu nabití .....	46
Obr. 17.	Průběh vnitřního odporu článků při vybíjení různými proudy.....	47
Obr. 18.	Průběh vnitřního odporu článků při nabíjení různými proudy .....	48
Obr. 19.	Korekční křivka $SOC_{CCM}$ získaná při měření konstantním proudem.....	49
Obr. 20.	Průběh relativní chyby metody CCM při odběru konstantního proudu 30A z akumulátoru.....	49
Obr. 21.	Náhodně vygenerovaný průběh proudu mimo definované diskrétní hladiny a jejich toleranční pásma .....	50
Obr. 22.	Korekční křivka $SOC_{CCM}$ získaná při měření nekonstantním proudem .....	51
Obr. 23.	Průběh relativní chyby metody CCM při odběru nekonstantního proudu z akumulátoru.....	52
Obr. 24.	Matematický výsledek první části testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	52
Obr. 25.	Srovnání výsledku odhadu metodou CCM s matematickým výsledkem první fáze testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3.....	53
Obr. 26.	Srovnání výsledku odhadu metodou CCM s matematickým výsledkem druhé a třetí fáze testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	53
Obr. 27.	Srovnání výsledku odhadu metodou CCM s matematickým výsledkem čtvrté a páté fáze testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	54
Obr. 28.	Průměrná relativní chyba metody CCM při páté fázi testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	54
Obr. 29.	Křivky závislosti napětí na kapacitě pro proudové hladiny 22, 25 a 28 A.....	56
Obr. 30.	Průběh relativní chyby v limitních hodnotách tolerančního pásma. ....	57
Obr. 31.	Test MOCV bez filtrace přechodů na různé proudové hladiny.....	58
Obr. 32.	Průběh relativní chyby MOCV bez filtrace přechodů na různé proudové hladiny .	58
Obr. 33.	Test MOCV s první filtrací přechodů na různé proudové hladiny.....	59
Obr. 34.	Průběh relativní chyby MOCV s první filtrací přechodů na různé proudové hladiny .....	60
Obr. 35.	Test MOCV s druhou filtrací přechodů na různé proudové hladiny.....	60

Obr. 36.	Průběh relativní chyby MOCV s druhou filtrací přechodů na různé proudové hladiny .....	61
Obr. 37.	Filtr napětí vstupujícího do algoritmu MOCV .....	61
Obr. 38.	Test MOCV s třetí filtrací přechodů na různé proudové hladiny .....	62
Obr. 39.	Průběh relativní chyby MOCV s třetí filtrací přechodů na různé proudové hladiny 62	
Obr. 40.	Test MOCV s čtvrtou filtrací přechodů na různé proudové hladiny .....	63
Obr. 41.	Průběh relativní chyby MOCV s čtvrtou filtrací přechodů na různé proudové hladiny .....	63
Obr. 42.	Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem v první fázi testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	64
Obr. 43.	Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem druhé a třetí fáze testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	65
Obr. 44.	Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem čtvrté a páté fáze testovací sekvence dle kapitoly 8.2.1.3 .....	65
Obr. 45.	Odhadovaná kapacita metodou MOCV při náhodném proudu mimo definované diskrétní hladiny a jejich toleranční pásma .....	67
Obr. 46.	Porovnání odhadu pomocí metody CCM a modifikované metody OCV .....	69
Obr. 47.	Průběh výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 50:50	69
Obr. 48.	Průběh výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 a průběh jeho relativní chyby .....	70
Obr. 49.	Průběh relativní chyby výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 pro druhou a třetí fázi testovací sekvence .....	71
Obr. 50.	Průběh relativní chyby výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 pro čtvrtou a pátou fázi testovací sekvence .....	71
Obr. 51.	Průběh relativní chyby výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 pro vadný akumulátor se sníženou kapacitou .....	72
Obr. 52.	Odhady klidové hodnoty SOC pomocí standardní metody OCV a průběh relativních chyb těchto odhadů .....	74
Obr. 53.	Matematický výsledek testovací sekvence dle pro akumulátor do elektr. kola ElectroLyte Vohrradler .....	75
Obr. 54.	Průběh odhadu kapacity akumulátoru ElektroLyte Vohrradler a jeho relativní chyby pomocí metody CCM v průběhu testovací sekvence .....	76
Obr. 55.	Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem v průběhu testovací sekvence ElectroLyte Vohrradler .....	77

## Seznam tabulek

Tab. 1.	Parametry zařízení Lukas StrongArm.....	32
Tab. 2.	Pracovní cyklus pro zařízení Lukas StrongArm při stříhání řetězu z oceli o průměru 10mm. ....	33
Tab. 3.	Celková testovací sekvence Lukas StrongArm.....	34
Tab. 4.	Parametry elektro-kola Electrolyte Vohrradler.....	35
Tab. 5.	Průměrné hodnoty testovacího profilu elektro-kola Electrolyte Vohrradler.....	39
Tab. 6.	Pravděpodobné proudové hladiny pro modifikovanou metodu odhadu SOC založenou na metodě OCV.....	57

## 1 Úvod

Dnes se téměř do všech oblastí lidské činnosti rozšířila přenosná zařízení. Za rozšířením akumulátorem poháněných přenosných zařízení stojí pohodlnost lidí a neustálé se zvyšující nároky na efektivitu a rychlost práce. Klasickým případem aplikace akumulátorů za účelem ulehčení práce je například šroubovák. Zatímco dříve se všechny šrouby utahovaly ručně, dnes je převážná většina šroubů utahována elektrickým šroubovákem. Elektrický šroubovák má hned několik výhod: utahování je rychlejší, úspornější na lidskou energii a uživatel si může nastavit požadovaný moment pro utažení šroubů. Na druhou stranu uživatel přichází o zpětnou vazbu a cit. Elektrický šroubovák ale ani zdaleka není jediné ruční zařízení určené pro ulehčení lidské práce. Asi největší přínos pro člověka má akumulátor ve spojení s elektromotorem napojeným na hydraulické zařízení. V takovém případě dokáže relativně malé a lehké zařízení bez problémů zvedat i desítky tun, roztrhat či rozstříhat profily vyrobené z prvotřídní oceli a může tak například rychle a efektivně zachraňovat lidské životy.

V dnešní době ale zároveň najdeme i mnoho odvětví, ve kterých si již člověk život bez akumulátoru nedovede představit. Klasickými zástupci takové aplikace jsou veškeré mobilní lékařské přístroje. Ať už se jedná o defibrilátor nebo „jen pouhou“ vysílačku či mobilní telefon, který má dnes v kapse v podstatě každý. Akumulátor umístěný v těchto zařízeních musí být bezpečný a elektronika (ať už se jedná o elektroniku v akumulátoru nebo o elektroniku v samotném přístroji) musí poskytnout uživateli co možná nejpřesnější odhad zbytkové provozní doby akumulátoru. Další oblastí, kde se dnes bleskově rozvíjí vývoj akumulátorového provozu, je doprava malého počtu osob. Do této oblasti spadají elektro kola, automobily a další pozemní, létající a plovoucí dopravní prostředky. U těchto prostředků je kladen velký důraz na distanční rádius, spolehlivost, bezpečnost a ekonomiku provozu. Výskyt těchto dnes hojně skloňovaných „zelených“ dopravních prostředků narůstá geometrickou řadou a to zejména v západních zemích. I když se o ekologičnosti všech těchto dopravních prostředků dá dlouze diskutovat, nic to nemění na faktu, že na poli zařízení napájených akumulátorem zastávají neopomenutelné místo.

V současné době se stále za nejlepší akumulátory pro většinu aplikací pokládají ty založené na lithiu. Do této kategorie spadají akumulátory Li-Pol, Li-Ion a LiFePO<sub>4</sub>. Všechny sekundární články založené na lithiu mají ovšem své nedostatky spočívající

zejména v omezení napěťových úrovní pro ukončení nabíjecího i vybíjecího procesu. Další kritický parametr u sekundárních lithiových článků je maximální vybíjecí a nabíjecí proud a teplota článků. Při nedodržení výrobcem stanovených úrovní hrozí poškození nebo dokonce exploze těchto článků. To je vážný důvod zabývat se elektronikou pro řídicí jednotku akumulátoru, která dokáže všechny kritické parametry měřit a v případě potřeby akumulátor od napájeného systému bezpečně odpojit.

## 1.1 Cíl disertační práce

Práce si klade za cíl představit přehledně a uceleně problematiku odhadu stavu nabití elektrochemických článků založených na lithiu, konkrétně pak článků Li-Ion. Obecná část práce je zaměřena na nejčastěji používané elektrochemické články určené pro napájení malých i velkých zařízení. Prvotním úkolem této práce je však popsat parametry sekundárních lithiových článků a fyzikální postupy pro jejich měření, hlavním úkolem práce je pak popis a vypracování metodik odhadu stavu nabití akumulátorů založených na snadno měřitelných parametrech sekundárních lithiových článků. Dalším úkolem této práce je návrh vlastních metod odhadu stavu nabití lithiového akumulátoru aplikovatelný na levné elektroniky, jejich otestování na velkém množství akumulátorů za různých podmínek a zhodnocení výsledků navržených metod jak v laboratorních podmínkách, tak v praktickém nasazení, a dále zhodnocení přesnosti odhadu stavu nabití z krátkodobého i dlouhodobého hlediska a v neposlední řadě i návrh zmenšení vlivu časové nestálosti parametrů článků na odhad stavu nabití.

## 1.2 Současný stav problematiky

V současné době se řada výrobců akumulátorů, používaných v levném a mnohdy nekvalitním nářadí, stále zabývá výrobou akumulátorů založených na technologiích Ni-MH nebo Ni-Cd. I když se o takové akumulátory budeme dobře starat a nebudeme je příliš využívat, dosáhneme poměrně krátké životnosti v řádu jednotek let. Mnozí výrobci o větší životnost nestojí a zakládají svou politiku na relativně nízké ceně a hromadném prodeji náhradních akumulátorů, nebo dokonce celého akumulátorového nářadí. Na druhou stranu jsou na trhu významné firmy, jako například Stihl, Black and Decker, Bosch, DeWALT, Makita, Spit a mnohé další, které nabízejí jak levné nářadí, tak nářadí pro profesionální (každodenní) využití. U takového nářadí je pak politika založena na kvalitě provedení, velké životnosti a výdrže na úkor vyšší ceny. Toto nářadí většinou využívá jako zdroj energie lithiové akumulátory, přičemž zhruba 95% lithiových

akumulátorů jsou akumulátory typu Li-Ion. Převažující zastoupení Li-Ion akumulátorů je způsobeno především jejich velkou bezpečností a životností. Překvapivé ovšem je, že u akumulátorů Ni-Cd a Ni-MH nebyl nikdy ze strany výrobců akumulátorů vyžadován žádný systém pro ochranu akumulátoru před zkratem, přebíjením nebo přílišným vybíjením. Tento fakt je zajímavý i proto, že například při zkratu tohoto akumulátoru se může uvolnit velké množství tepla, což může vést k roztavení a zkroucení obalu. Většina firem věnujících se výrobě akumulátorů začala krizové stavy řešit teprve s přechodem na lithiové akumulátory. I dnes se ovšem najdou výrobci, kteří do lithiových akumulátorů nepřidávají žádnou elektroniku a spoléhají na dobré chování uživatele a elektroniky umístěné ve spotřebiči.

S nástupem elektronik pro ochranu lithiových článků se zároveň začal velmi rozvíjet vývoj algoritmů pro odhad zbytkové kapacity akumulátorů. V některých aplikacích postačí uživateli jen velmi hrubý odhad, například v rozlišení 25 % nebo 33 %. Jedná se převážně o malé ruční nářadí, u kterého uživatel dokáže na základě signalizace odhadnout, zda bude schopen doříznout pár trámů či zašroubovat pár šroubů bez nutnosti dobít akumulátor. Na druhou stranu je v dnešní době čím dál více aplikací, při jejichž využití musí uživatel znát poměrně přesný odhad zbytkové kapacity akumulátoru. Do této kategorie spadají zejména již zmíněné dopravní prostředky a prostředky určené pro záchranu nebo udržení lidských životů. Na uvedené požadavky relativně pružně reagují výrobci integrovaných obvodů. V současné době tak má snad každý velký výrobce integrovaných obvodů svého zástupce na poli měření parametrů Li-Ion akumulátorů. Vedoucí místo v této kategorii integrovaných obvodů zastává již řadu let firma Texas Instruments. Nevýhodou těchto obvodů je ovšem poněkud vyšší cena, složitější nastavování parametrů pro správnou funkci a velmi omezené komunikační schopnosti s nadřazeným systémem. A právě cena výsledného produktu a komunikační rozhraní je ve většině případů rozhodujícím faktorem pro návrh ochranné elektroniky. Při velkých sériích ochranných elektronik nebo při požadavku na konkrétní komunikační rozhraní se tedy vyplatí navrhnout vlastní elektronickou ochranu akumulátoru založenou na mikroprocesoru a analogových či digitálních obvodech pro měření parametrů článků. Toto řešení je sice dražší na vývoj a vyžaduje větší zkušenosti vývojáře, zato ale nabízí plnou kontrolu nad chováním elektroniky a výsledná elektronika je pro sériovou výrobu mnohdy výrazně levnější.



## 2 Elektrochemický akumulátor

Mluvíme-li o akumulátoru, máme na mysli sekundárním článku. Tento pojem zahrnuje zdroj elektrické energie, který může být po svém nabití použit jako zdroj elektrické energie. Tento jev je způsoben vratnými chemickými procesy, probíhajícími při průchodu nabíjecího i vybíjecího proudu. Zmíněné chemické procesy se projeví rozdílným elektrochemickým potenciálem na elektrodách. Po nabití je možné vlivem těchto elektrochemických změn čerpat z akumulátoru elektrickou energii zpět, přičemž je zde nutné podotknout, že nabíjecí proces není nic ekonomicky výhodného, neboť účinnost elektrochemického procesu nabíjení se pohybuje okolo 80 %. Tato práce se bude zabývat zejména články typu lithium ion, lithium polymer a lithium železo fosfát.

### 2.1 Lithiový článek typu lithium iont

Články typu lithium iont (dále jen Li-Ion) se vyrábí, pokud nebudeme brát v potaz články pro automobilový průmysl, převážně ve čtyřech velikostních provedeních. Vždy se jedná o kovový válcový článek. Jmenovité napětí tohoto typu článků je 3,7 V a povolené provozní napětí těchto článků je v rozmezí 2,5 ÷ 4,2 V. V označení článků Li-Ion článku je vždy zakódována velikost. Nejrozšířenější velikost článků Li-Ion je 18650. Toto označení říká, že článek má průměr 18 mm a jeho délka je 650 mm. Obdobně se Li-Ion články značí 10440, 14500 a největší provedení je 26650.

### 2.2 Lithiový článek typu Lithium železo fosfát

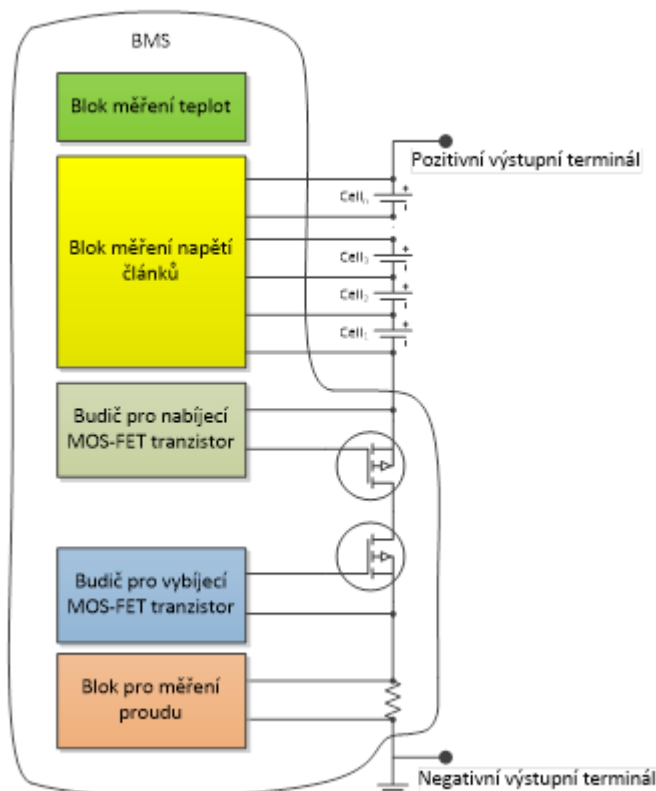
Články typu lithium železo fosfát (dále jen LiFePO<sub>4</sub>) se vyrábí ve dvou standardizovaných velikostních provedeních 18650 a 26650. Tyto články se také často označují jako A123. Jmenovité napětí tohoto typu článků je 3,3V a povolené provozní napětí je v rozmezí 2,8 ÷ 3,6 V. Články LiFePO<sub>4</sub> se dnes vyrábí jako samostatné články nebo v průmyslové (vnitřně chemicky balancované) variantě. Ty však nejsou obsahem této práce. Z omezených rozměrů Li-Ion a LiFePO<sub>4</sub> článků plyne i omezení jejich maximální kapacity.

### 2.3 Lithiový článek typu lithium polymer

Články typu lithium polymer (dále jen Li-Pol) je možné vyrobit s prakticky libovolnou velikostí a kapacitou. Jmenovité i provozní napětí tohoto typu článku je shodné s článkem typu Li-Ion.

### 3 Základní bloky elektroniky

Každá elektronika pro ochranu Li-Ion článků se dá rozdělit do několika bloků (modulů), přičemž každý blok má na starosti měření fyzikální veličiny nebo ovládání akčního členu. Minimální počet bloků elektroniky sice není exaktně dán, ale každá elektronika pro ochranu Li-Ion článků by měla obsahovat alespoň bloky shodné s blokovým schématem z obr. 1.



Obr. 1. Blokové schéma elektroniky pro ochranu Li-Ion článků

#### 3.1 Blok měření teplot

Blok měření teplot se stará o měření teplot jednotlivých článků a měření teplot výkonových prvků.

##### 3.1.1 Měření teploty článků

Měření teplot článků je nezbytné pro dlouhou životnost akumulátorů. Standardní limity udávané pro vybíjení (respektive pro nabíjení) článků jsou v rozsahu  $-20 \div +60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $0 \div +45 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pro měření teploty článků se zpravidla používají termistory typu NTC, které se lepí přímo na povrch článků. Při překročení teplotního limitu musí být akumulátor od zátěže (nabíječky) odpojen, dokud se teplota článků nevrátí do přijatelných mezí.

### 3.1.2 Měření teploty výkonových spínacích prvků

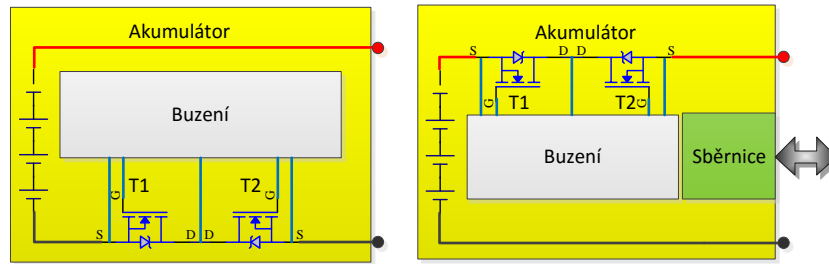
Jelikož i nejlepší výkonové tranzistory pro spínání vyššího napětí ( $60 \div 80 \text{ V}$ ) mají v sepnutém stavu odpor kanálu okolo  $1 \text{ m}\Omega$  a vybíjecí proudy se pohybují v řádu desítek ampérů, je nutné teplotu tranzistorů měřit. K levnému měření teploty tranzistorů se dá využít například propustně polarizovaný PN přechod diody.

### 3.2 Blok měření napětí článků

Tento blok, jak nám napovídá již jeho název, slouží pro měření napětí článků. Napětí článků je u akumulátorů založených na lithiu velice důležitý údaj. Napětí plně nabitého článku nesmí přesáhnout napětí  $4,23 \text{ V}$  a napětí vybitého článku by nemělo dlouhodobě poklesnout pod hodnotu  $3,0 \text{ V}$ . Zatímco někteří výrobci článků měření napětí jednotlivých článků v sériovém řazení nevyžadují, je i spousta výrobců, kteří odmítají z důvodů bezpečnosti dodávat články odběratelům, pokud jim tyto neprokáží vlastnictví elektroniky schopné přesného měření napětí článků v sériovém řazení a případně i schopnosti články balancovat. Existuje mnoho metod pro měření napětí článků, nejjednodušší způsob je například použití přepínaného děliče napětí. Dále můžeme využít přepínaných kondenzátorů a v neposlední řadě máme v dnešní době na trhu velké množství specializovaných a mnohdy stohovatelných obvodů pro měření napětí jednotlivých článků. Napětí měřené pomocí specializovaných obvodů je zpravidla velmi přesné a tyto obvody dokáží z obvykle suplovat i funkci napájecího zdroje a operačního zesilovače pro měření proudu. Vlastnosti těchto integrovaných obvodů jsou ale bohužel vykoupeny vyšší cenou, která je mnohdy určujícím kritériem zákazníka.

### 3.3 Budiče pro výkonové spínací tranzistory

Jelikož jsou akumulátory většinou konstruovány pro velké výstupní proudy v řádu desítek ampér trvalého a stovek ampér zkratového proudu, je nezbytné rychlé ovládání výkonových MOS-FET tranzistorů, tak aby zůstaly v SOA. Z toho plyne, že tranzistory musí být sepnuty v řádu stovek až jednotek ns a ve stejném časovém úseku také rozepnuty. Napětí  $U_{GS}$  přitom musí být co možná největší z důvodu minimalizace odporů jejich kanálu v sepnutém stavu. Budiče a výkonové MOS-FET tranzistory mohou být zapojeny buď v záporné, nebo kladné cestě mezi články a zátěží. Umístění výkonových tranzistorů je zpravidla ovlivněno přítomností či absencí komunikačního rozhraní mezi akumulátorem a zátěží (v případě komunikace není zpravidla možné rozepnout potenciál země). Oba případy jsou znázorněny na obr. 2.



Obr. 2. Zapojení tranzistorů v akumulátoru a) bez komunikace b) s komunikací

### 3.4 Blok pro měření proudu

Každý lithiový akumulátor má definovanou maximální hodnotu vybíjecího a nabíjecího proudu. Omezení nabíjecího proudu je většinou řešeno na straně nabíječky a elektronika tento problém řešit nemusí. Oproti tomu proud tekoucí do zátěže není zpravidla na straně spotřebiče omezen. Měření proudu by mělo být levné, přesné a rychlé. Nejlevnější metoda měření proudu může být založena na měření úbytku napětí na kanálu sepnutého výkonového MOS-FET tranzistoru, v lepším případě měření úbytku na vodiči mezi elektronikou a zemí akumulátoru. Preciznější měření proudů je možné za použití operačního zesilovače a přesného měřicího rezistoru. V takovém případě je možné měřit jak vybíjecí, tak i nabíjecí proud s poměrně velkou přesností.

## 4 Parametry článků

Pomocí bloků z kapitoly 3 lze poměrně jednoduše měřit základní fyzikální parametry článků. Jako každý zdroj energie, tak i lithiový článek má svůj vnitřní odpor, jmenovité (nominální) napětí, proudové a teplotní limity pro vybíjení i nabíjení. Maximální trvalý (i špičkový) vybíjecí proud souvisí s velikostí vnitřního odporu a maximální přípustnou teplotou článku, neboť je zřejmé, že na vnitřním odporu článku vzniká výkonová ztráta, viz vzorec (1).

$$P_Z = I^2 \cdot R_{IN} [W] \quad (1)$$

Kde je  $P_Z$  výkonová ztráta,  $I$  proud vytékající z (vtékající do) článku a  $R_{IN}$  vnitřní odpor článku.

U každého článku musíme ale znát také jeho vnitřní parametry, jako jsou stav nabití anebo například stáří článku. Tyto parametry již není možné jednoduchým fyzikálním způsobem měřit. Jinými slovy, nelze zajít do obchodu a zakoupit měřicí přístroj, který dokáže měřit zbytkovou kapacitu článku. Z tohoto důvodu bylo nutné vyvinout metody pro „odhad“ zbytkové kapacity článků, jejich stáří a další parametry.

## 5 Vnitřní parametry článku

Všechny důležité parametry článků jsou uvedeny ve specifikaci Smart Battery Data Specification (dále jen standard SBS) [2]. Specifikace byla vytvořena v roce 1995 za spolupráce významných firem operujících na poli lithiových akumulátorů. Tato specifikace se nezabývá pouze parametry článků, ale v rozšířené verzi slouží také jako standard pro komunikační sběrnici používanou pro komunikaci mezi akumulátorem a zátěží (nabíječkou). Standard komunikační sběrnice vyplývající z této specifikace se nazývá Systém Management Bus [3][4][5] a z ní vyplývající sběrnice se nazývá SMBus.

Jedním z nejdůležitějších parametrů článku je jmenovitá kapacita. Tento údaj je udáván výrobcem v katalogovém listu článku. Jedná se o teoretickou (ideální) hodnotu kapacity změřenou v laboratorních podmínkách. Z tohoto parametru vychází parametr označovaný jako kapacita plně nabitého akumulátoru. Jinak lze tento údaj označit jako předpokládá (naposledy naměřená) kapacita článku. Poměr mezi jmenovitou kapacitou článku a kapacitou plně nabitého článku udává životnost akumulátoru. Pokud tento poměr klesne pod 80 %, článek je možné označit za vadný a je třeba ho vyměnit. Dalším údajem, který se týká stavu nabití je relativní stavu nabití akumulátoru. Ten udává procentuální poměr mezi aktuální kapacitou článku a kapacitou plně nabitého článku. Tento údaj budeme dále označovat jako SOC. Při testování metod odhadu SOC bude z důvodu lepší porovnatelnosti výsledků udávána hodnota zbývající kapacity akumulátoru. Naproti tomu údaj absolutního stavu nabití označuje procentuální poměr aktuální kapacity článku vztažené k jmenovité kapacitě článku.

Pro odhad stavu nabití článku bylo postupem času vyvinuto několik principů. Tyto principy budou popsány v kapitole 6.

## 6 Metody odhadu zbytkové kapacity článků

Základní metody pro odhad zbytkové kapacity článku můžeme rozdělit do tří skupin. Jedná se o:

- 1) Metodu integrace proudu tekoucího z (do) článku.
- 2) Metodu napětí článku naprázdno.
- 3) Metodu založená na měření změny vnitřního odporu článku.

### 6.1 Metoda integrace proudu tekoucího z (do) článku

Tato metoda se anglicky nazývá Coulomb Counting Method (dále jen CCM). Jak již plyne z názvu, využívá tato metoda pro stanovení hodnoty zbytkové kapacity článku sumu proudu tekoucího z (do) článku. Je jasné, že nelze měřit proud tekoucí do každého článku akumulátoru zvlášť. To by bylo silně neekonomické, jen velice těžko realizovatelné a zhoršovalo by to parametry výsledného akumulátoru. Pro úspěšné použití této metody je třeba znát konfiguraci akumulátoru, tedy kolik článků je použito v paralelním zapojení a kolik těchto paralelních kombinací je řazeno v sérii. Tato konfigurace se obvykle značí mSnP, kde je mS počet sériově řazených článků a nP počet paralelně řazených článků. Další předpoklad pro tuto metodu je, že všechny články v akumulátoru jsou shodné (mají stejný vnitřní odpor a kapacitu). Z chování této metody dále plyne, že pro stanovení SOC je třeba znát výchozí stav článku, tedy SOC při probuzení akumulátoru z režimu spánku do aktivního režimu. Tato metoda vyžaduje uchování předchozí hodnoty SOC ve vnitřní paměti elektroniky. Za předpokladu splnění těchto podmínek můžeme aplikovat metodu CCM pro zjišťování SOC dle vztahu (2) a pro diskretní čas dle (3).

$$SOC = \frac{\int_{t_0}^t (i \cdot K) d\tau}{C100} + SOC_0 \quad [\%] \quad (2)$$

$$SOC = \frac{\sum_{t_0}^t (i_n \cdot K)}{C100} + SOC_0 \quad [\%] \quad (3)$$

Kde je C100 kapacita plně nabitého článku (akumulátoru), K faktor zahrnující účinnost nabíjecího procesu a  $SOC_0$  počáteční stav nabití akumulátoru. Faktor zahrnující účinnost nabíjecího procesu je koeficient, se kterým se počítá pouze při jedné polaritě proudu. V podstatě je jedno, zda se jedná o proud nabíjecí, nebo o proud vybíjecí. V případě, že se jedná o proud nabíjecí, musí toto číslo být větší než jedna, v opačném

případě musí být číslo menší než jedna. Účinnost nabíjecího procesu je způsobena jednak chemickou reakcí probíhající uvnitř článku a rovněž výkonovou ztrátou vznikající na vnitřním odporu článku. Pokud jsou vzaty v úvahu moderní Li-Ion články, dosahuje účinnost jednoho cyklu akumulátoru (účinnost nabíjecího + účinnost vybíjecího procesu) přibližně 94 % při úvaze pouze integrálu proudu. Pokud je ovšem uvažována účinnost jednoho cyklu článku při pohledu na Wh vybité z článku a Wh nabité zpět do článku, klesne účinnost na hodnotu okolo 85 %. Tento rozdíl je způsoben rozdílnou vybíjecí a nabíjecí VA charakteristikou článků.

Výchozí stav pro počítání SOC lze kalibrovat při dosažení limitních parametrů článků nebo dané aplikace. Jedná se o stav hlubokého vybití (akumulátor je za hluboce vybitý označen, pokud napětí libovolného článku dosáhne nastavené hranice, která je nejčastěji 2,9V) a stav plně nabitého akumulátoru (akumulátor je označen za plně nabitý, pokud napětí libovolného článku dosáhne programátorem stanovené hranice, nejčastěji 4,16V). V případě dosažení spodního limitu článku se nastaví výchozí hodnota SOC na 0. V průběhu nabíjení se integruje proud vtékající do akumulátoru a SOC se zvětšuje. V případě dosažení napětí plně nabitého akumulátoru s ukončení nabíjení se vypočítá absolutní kapacita uložená v článku a tato kapacita se označí jako 100% SOC. Jelikož absolutní kapacita článku není konstantní (mění se s časem a počtem cyklů) a rozlišovací schopnost obvodů pro měření proudu také není nekonečná, je nutné provádět kalibraci odhadu SOC při každém cyklu akumulátoru.

Ve většině průmyslových aplikací uživateli stačí znát SOC pouze v procentech nabití a uživatel si sám odhadne zbytkovou dobu práce s daným zařízením. V takovém případě není třeba znát dimenzovanou kapacitu akumulátoru a postačí vycházet pouze z naintegrovaných hodnot proudu. Jiná situace nastane v medicínské nebo záchranné technice, kde uživatel daného zařízení musí znát přesnou minimální zbytkovou dobu provozu zařízení se stávajícím nebo průměrným zatížením akumulátoru. V takovém případě je nezbytné znát dimenzovanou kapacitu akumulátoru a mít k dispozici přesnější metodu měření proudu, neboť právě na přesnosti měření proudu závisí přesnost této metody. Dále je nezbytné znát předchozí chování akumulátoru při stejné nebo podobné zátěži.



## 6.2 Metoda napětí článku na prázdno

Tato metoda se anglicky nazývá Open Circuit Voltage (dále jen OCV). Z názvu je patrné, že pro získání odhadovaného stavu nabití článku je použito napětí nezatíženého článku. Tuto metodu tedy nelze použít pro získávání stavu nabití článků při připojené zátěži, ale pouze tehdy, když je zátěž od akumulátoru odpojena. Jelikož se napětí akumulátoru v závislosti na připojené zátěži nemění skokově, ale k jeho ustálení dojde teprve postupem času, je nutné pro správný odhad SOC pomocí této metody počkat po odpojení zátěže na ustálení napětí článků. K úplnému ustálení napětí článku sice dochází po uplynutí několika dní, z experimentálního měření parametrů této metody ovšem plyne, že doba potřebná pro ustálení napětí na akceptovatelnou klidovou hodnotu je přibližně 5 minut.

Metoda je založena na uložení tabulky OCV do paměti mikroprocesoru, přičemž tabulka OCV je získána vybíjením článku proudem který je alespoň 100x menší, než je jmenovitá kapacita článku. Získání tabulky OCV je tedy poměrně zdlouhavý proces. Tento prvotní čas je ale vykoupen poměrně velkou přesností této metody pro stanovení SOC při probuzení elektroniky. Dalším důležitým parametrem pro získání tabulky pro co možná nejpřesnější odhad je nastavení stejného počátečního a konečného napětí akumulátoru pro kalibrační proces, jako bude využíván v reálné aplikaci daného akumulátoru. Matematický popis metody je tedy následující.

$$SOC = f(OCV) [\%] \quad (4)$$

Při implementaci této metody je možné nechat elektroniku akumulátoru při odpojené zátěži trvale v režimu spánku a nebudit ji v pravidelných intervalech pro zjištění velikosti samovybíjení akumulátoru. Metoda OCV tedy může být použita pro zpřesnění či odhad počátečního stavu SOC pro metodu CCM.

## 6.3 Metoda založená na měření změny vnitřního odporu článku

Tato metoda se anglicky nazývá Battery Internal Resistance (dále jen BIR) a využívá pro určení stavu nabití článku změnu jeho vnitřního odporu. Ten se mění v průběhu vybíjení akumulátoru (nejvíce však v koncové fázi vybíjení akumulátoru) a zároveň roste se stářím akumulátoru. Metodu je tedy možno využít pro zjištění blízkého se podpětového limitu akumulátoru a zjištění stáří akumulátoru. Jelikož v

elektronice akumulátoru zpravidla není žádná možnost připojení dodatečné zátěže k akumulátoru, je tato metoda aplikovatelná pouze v případě připojené zátěže s pokud možno velkým a konstantním proudovým odběrem. Další předpoklad pro úspěšné použití této metody je žádná nebo jen velmi malá citlivost zátěže na krátkodobý výpadek napájecího napětí. V případě splnění těchto podmínek je možné tuto metodu aplikovat následujícím způsobem. V časovém intervalu 1 ms změřím napětí požadovaného článku (například 3,625 V) a proud tekoucí do zátěže (například 15 A). Následně mikroprocesor rozezne výkonové MOS-FET tranzistory a počká 1 – 5 ms na ustálení přechodových dějů a dosažení nulového proudu. Jakmile mikroprocesor naměří proud 0 A, změří napětí stejného článku (například 3,935 V) a opět sepne výkonové MOS-FET tranzistory. Výsledný stejnosměrný vnitřní odpor článku se pak vypočítá pomocí vzorce (5).

$$R_{DC} = \frac{U_0 - U_I}{I} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (5)$$

Kde je  $R_{DC}$  stejnosměrný vnitřní odpor článku,  $U_0$  bezproudé napětí článku,  $U_I$  napětí s připojenou zátěží a  $I$  proud tekoucí do zátěže v okamžiku měření napětí se zátěží. Tímto výpočtem je dosaženo hodnoty vnitřního odporu okolo 21m $\Omega$ . Již z údajů vstupujících do vzorce pro výpočet stejnosměrného vnitřního odporu článku plyne, že je tato metoda velice náročná jak na přesnost měření napětí článku, tak i na přesnost měření proudu. Metoda tedy vyžaduje přesný HW a je obtížně integrovatelná do levných BMS.

#### 6.4 Kombinace zmíněných metod

Nejllepších výsledků je možné dosáhnout použitím kombinace zmíněných metod. To znamená, že pro dynamický odhad SOC je využita metoda CCM, která poskytuje relativně přesný odhad SOC za předpokladu pomalých změn proudu, neboť v případě použití této metody, jakožto i všech ostatních metod, musí být splněn vzorkovací teorém. Maximální frekvence změn proudu tedy musí být alespoň dvakrát pomalejší, než zvolená vzorkovací frekvence. Umístění vhodného filtru na výstup obvodu pro měření proudu aliasing efekt vyruší, ale i tak je kladen velký důraz na častý sběr dat do metody CCM. Počáteční hodnoty SOC pro metodu CCM lze získat buď, jak již bylo řečeno, pomocí kalibrace za stavu hlubokého vybití a plného nabití článku, nebo na základě odhadu metodou OCV za předpokladu nulového výstupního (vstupního) proudu po dobu alespoň 5 minut. Tuto metodu lze tedy použít pro zpřesnění výsledku z metody CCM před

přechodem do režimu spánku a po jeho opuštění, což je umožněno pomocí následujícího algoritmu: Po ukončení činnosti napájeného zařízení rozeprve elektronika výkonové MOS-FET tranzistory, spustí časovač pro odpočet času nutného pro ustálení výstupního napětí článků a hlídá, zda není požadavek na nové spuštění napájeného zařízení. Pokud nedojde k nové aktivaci zařízení, je odečtena hodnota SOC a elektronika jde do režimu spánku. Při probuzení BMS je z paměti vyčtena poslední známá hodnota SOC (OCV) a ta je porovnána s aktuální zjištěnou hodnotou a je provedena korekce SOC. Pomocí této metody je tedy možné zjistit, kolik energie se z akumulátoru ztratilo za čas spánku BMS.

Metoda BIR je použitelná, vzhledem ke své složitosti, pouze k detekci blížícího se konce vybíjecího procesu a detekci stáří akumulátoru. Výsledek z této metody není možné použít pro odhad SOC v reálném čase, neboť akumulátor neovlivní rychlost ani velikost změn proudu tekoucího z (do) akumulátoru jinak než skokovou změnou z aktuální hodnoty na nulu. Další již zmíněná podmínka této metody je ignorování krátkodobých výpadků napájecího napětí zátěží, což je možné pouze u motorových zátěží, které nejsou vybaveny regulační elektronikou. Další nevýhodou tohoto druhu detekce SOC u induktivních zátěží je velká zpětná indukční špička, která namáhá výkonové MOS-FET tranzistory. Elektronika musí tedy obsahovat přídatné ochranné prvky pro ochranu tranzistorů.

## 6.5 Vlastní navržená metoda odhadu stavu nabití lithiových článků

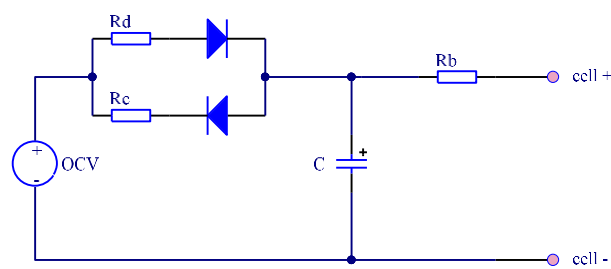
Standardní metodu OCV lze dále modifikovat pomocí měření průběhu napětí na zatíženém článku. Tuto metodu bude dále označována jako MOCV. V praxi to znamená, že v paměti mikroprocesoru nebude uložena pouze křivka OCV, ale také několik vybíjecích a nabíjecích křivek akumulátoru v závislosti na různých konstantních proudových hladinách. Jako příklad lze uvést zařízení s definovaným průběhem odebíraného proudu, který je možné klasifikovat do několika diskretních hladin a tolerančních pásem odpovídajících těmto hladinám. Toleranční pásmo musí zohlednit maximální přípustnou chybu odhadu, přesnost měření proudu a pokles proudového zatížení akumulátoru v průběhu poklesu jeho výstupního napětí, případně nárůstu proudového zatížení je-li zátěž vybavena regulátorem regulujícím na konstantní výkon. V ideálním případě může být zátěž vybavena regulátorem na konstantní odebíraný proud.

Další předpoklad použití metody MOCV je v relativně dlouhém čase setrvání zařízení při konstantním zatížení akumulátoru. V případě splnění těchto podmínek je

možné odměřit tabulky závislosti napětí článku na jeho stavu nabití pro dané diskrétní hladiny proudového zatížení. V praxi může být tato hladina jedna (standardní metoda OCV), nebo jich může být i několik desítek (jedna, či několik hladin pro nabíjení článků, jedna hladina pro nulový proud a jedna, či několik hladin pro vybíjení článků). Čím více hladin algoritmus obsahuje a čím je přesnější zvolená metoda měření proudu a napětí, tím je výsledek odhadu SOC přesnější. Jelikož i v případě změny proudového zatíženého článku dochází k postupné stabilizaci napětí a stav nabití je stavová veličina, je možné přidat do této metody určování stavu nabití filtr pro zajištění pozvolnějších změn odhadu SOC a omezení jeho chyby. Dále si při použití této metody musí vždy programátor aplikující tuto metodu uvědomit konfiguraci akumulátoru. Konkrétně kolik paralelně řazených článků akumulátor obsahuje a tímto počtem vydělit proud každé proudové hladiny požadované daným zařízením. Případně odměřit chování článků na dané proudové zatížení na kompletním akumulátoru určeném pro danou aplikaci. Výsledný tvar metody MOCV by se dal vyjádřit pro diskrétní čas vztahem (6).

$$SOC = OCV[U_0 - (R_{in} \cdot I)] \quad [\%] \quad (6)$$

Kde je  $R_{in}$  vnitřní odpor článku a  $I$  proud tekoucí z (do) článku přičemž proud vytékající z článku má záporné znaménko. Pro snazší pochopení toho, co se skrývá pod vnitřní impedancí článku, si lze představit zjednodušený model článku. Tento model je vyobrazen na obr. 3.



Obr. 3. Zjednodušený model článku

Na levé straně schématu se nachází zdroj označený jako OCV. Tento zdroj reprezentuje napětí článku na prázdko. K tomuto zdroji je připojena paralelní dvojice vnitřních odporů článku. Jelikož se nejedná o odpor vznikající nedokonalostí spojení elektrod s kontaktem článku, ale o odpor způsobený elektro-chemickou reakcí, je tento odpor různý pro nabíjecí i vybíjecí cestu. Kondenzátor  $C$  vyjadřuje dynamickou změnu chování článku v čase. Rezistor  $R_b$  pak vyjadřuje část impedance článku, která je stejná

jak pro nabíjecí, tak pro vybíjecí cestu (odpor mezi elektrodou akumulátoru a jeho kontaktem).

## 7 Testy metod pro odhad stavu nabití akumulátoru

V této kapitole budou popsány prostředky využité pro testování metod odhadu stavu nabití akumulátoru, počáteční podmínky pro testy, zvolené testovací sekvence a průběh testů.

### 7.1 Popis testovacího vybavení

Pro testování přesnosti metod odhadu stavu nabití bylo nutné navrhnout zapojení s přesnou elektronickou zátěží a nabíjecím zdrojem. Obě zařízení musela mít možnost tvorby předvoleného profilu vstupního (výstupního) proudu a napětí. Další vstupní požadavek byla možnost počítání kapacity a logování všech údajů. Za tímto účelem byla vybrána elektronická zátěž od firmy Elektroautomatik s označením EA-EL 9160-300 [6] a nabíjecí zdroj EA-PSI 8160-60 [7] od stejného výrobce.

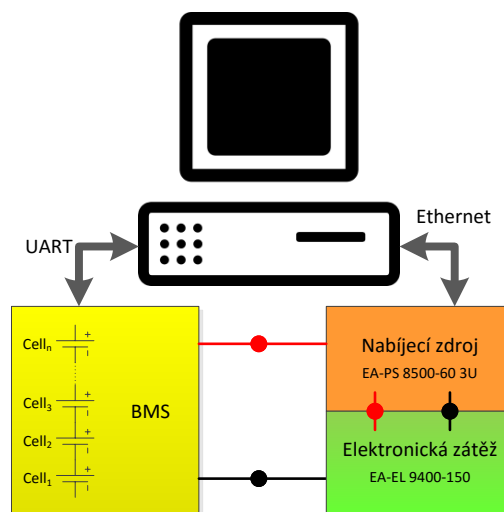
Parametry elektronické zátěže:

- Maximální vstupní napětí 160V
- Maximální trvalý vybíjecí proud 300A
- Maximální trvalá výkonová ztráta 7200W

Parametry nabíjecího zdroje:

- Maximální výstupní napětí 160V
- Maximální výstupní proud 60A
- Maximální trvalý výstupní výkon 3000W.

Elektronická zátěž a zdroj jsou spojeny paralelně a je tak možné volit libovolný průběh nabíjecího a vybíjecího proudu. Blokové zapojení testovacího obvodu je na obr. 4.



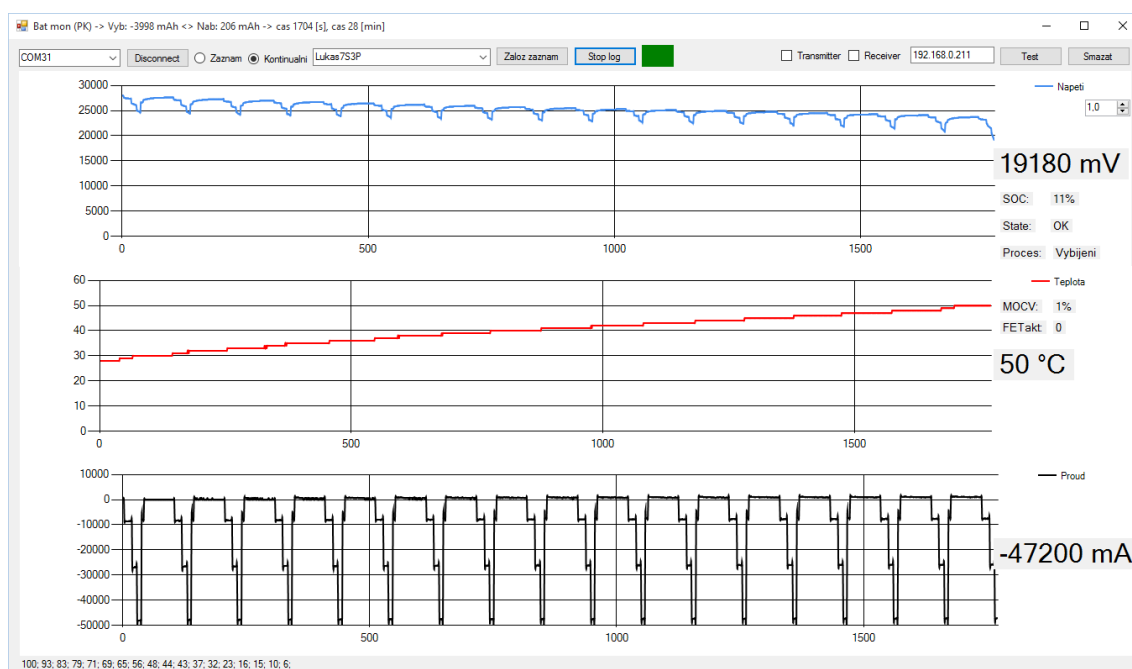
Obr. 4. Blokové schéma testovacího systému

Na obr. 5. je zobrazeno reálné testovací pracoviště z firmy Akku Power GmbH. Toto pracoviště je vybaveno dvěma testovacími sestavami z obr. 4.



Obr. 5. Reálné měřicí pracoviště

Pomocí počítače lze nastavit náhodné změny proudu v rozmezí 500ms až „nekonečno“. Takovýmto způsobem je možné vytvořit simulaci naměřené reálné zátěže s možností libovolného počtu opakování, což umožňuje otestovat několikrát všechny metody odhadu stavu nabití a vzájemně porovnat jejich úspěšnost. O ovládání elektronické zátěže se stará program EasyLoad Lite [8] od výrobce zátěže Elektro Automatic, o ovládání zdroje se pak stará program EasyPower Lite [9]. Tato aplikace je rovněž dílem firmy Elektro Automatic. Aby bylo možné sledovat vnitřní stavy BMS, byla BMS připojena k počítači pomocí galvanicky odděleného sériového komunikačního rozhraní. Pro příjem, zpracování a ukládání dat z BMS byla vytvořena speciální aplikace. Tato aplikace byla nazvána BatMon a je vyobrazena na obr. 6. V aplikaci je možné zobrazit tři grafy pro sledování průběhu veličin v reálném čase a dále sledovat aktuální hodnoty ostatních dostupných veličin.



Obr. 6. Aplikace BatMon pro příjem a zobrazení údajů z BMS

## 7.2 Popis testovacích sekvencí

Jelikož jsou metody odhadu stavu nabití akumulátoru v této práci testovány na dvou typech akumulátorů s odlišným chováním a využitím, bylo nutné stanovit testovací sekvenci pro každý akumulátor zvlášť.

### 7.2.1 Testovací sekvence pro akumulátor do záchranného zařízení Lukas

Jako první testovací sekvence byla zvolena sekvence naměřená na záchranném zařízení pro hasiče vyráběném firmou Lukas pod označením StrongArm [10] při stříhání řetězu vyrobeného z oceli o průměru 10mm.

#### 7.2.1.1 Popis záchranného zařízení Lukas

Záchranné zařízení obsahuje stejnosměrný motor o jmenovitém výkonu 1000W. Tento motor je napojený na výkonnou hydrauliku opatřenou ventily pro ovládání síly a směru pohybu čelistí. Základní parametry záchranného zařízení jsou uvedeny v Tab. 1 a zařízení je vyobrazeno na obr. 7.

Tab. 1. Parametry zařízení Lukas StrongArm

Hmotnost elektro-kola	11 kg
Maximální síla v čelistech při stříhu	155 kN
Maximální síla v čelistech při rozpírání	30 kN
Jmenovitý výkon instalovaného elektromotoru	1000W
Konfigurace akumulátoru	7S3P (25,2 V / 3,8 Ah / 96 Wh)





Obr. 7. Záchrané zařízení pro hasiče Lukas StrongArm [11]

Rozběhový proud hydraulických nůžek je 450 A. Z toho vyplývá, že akumulátor musí být schopen měřit proudy v rozsahu +15 A (maximální nabíjecí proud při použití rychlé nabíječky) až -580 A (limit pro vyhodnocení zkratu s dostatečnou rezervou pro rozběhový proud podchlazené hydrauliky v zařízení). Pracovní rozsah proudu při použití 12-ti bitového převodníku a jednoduchého obvodu pro snímání proudu bez možnosti přepínání rozsahu znamená rozlišovací schopnost přibližně 146 mA / bit. Tento fakt ovšem platí za ideálních podmínek a za stabilního napájecího napětí pro mikroprocesor i OZ pro měření proudu. Dá se tedy očekávat poměrně velké zarušení hodnot proudu vstupujících do algoritmů odhadu SOC.

### 7.2.1.2 Popis testování

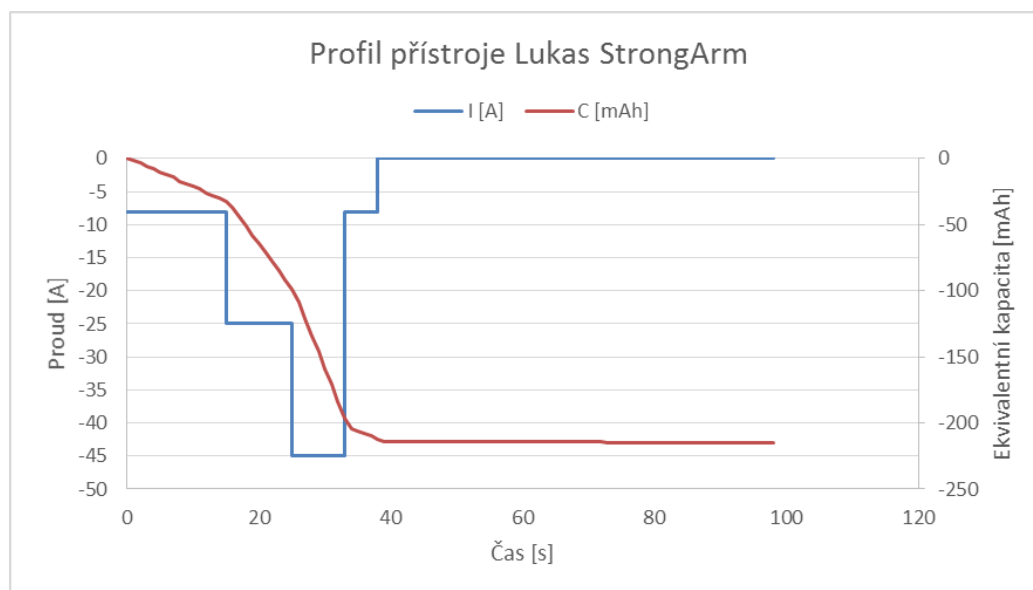
Testovaný akumulátor a testovací sekvence nebyly zvoleny náhodou, neboť právě u záchraného systému pro hasiče je kladen velký důraz na přesnost odhadu SOC. Dalším kritickým parametrem této aplikace je rozsah provozních teplot, pro které musí být tyto metody odhadu otestovány. Akumulátor musí být schopen pracovat po dobu 10 minut v teplotách od -30 do +120 °C.

Lukas StrongArm je záchraný systém, na kterém závisí záchrana lidských životů, ale i záchrana životů hasičů samotných. Z toho plyne, že odhadovaná zbytková kapacita akumulátoru musí být v každé teplotě i provozním režimu stroje zobrazena s přesností  $\pm 5\%$ . Profil pro testování algoritmů pro odhad SOC je znázorněn v tab. 2. a pro lepší názornost je tento profil vyneseno do grafu na obr. 8.

Tab. 2. Pracovní cyklus pro zařízení Lukas StrongArm při stříhání řetězu z oceli o průměru 10mm.

Čas [s]	15	10	8	8	60
Proud [A]	-8	-25	-45	-8	0

Odpovídající Kapacita [mAh]	-32	-67	-97	-16	0
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	---



Obr. 8. Průběh pracovního cyklu rozšířený o průběh spotřebované kapacity.

V zařízení Lukas je umístěn výkonný stejnosměrný motor pro ovládání hydrauliky bez možnosti rekuperace energie. Aby bylo možné algoritmy plně otestovat, bylo nezbytné do testu dodat profil nabíječky. Nabíječka pro tento akumulátor funguje ve standardním režimu pro nabíjení lithiových akumulátorů, tj. akumulátor je nabíjen konstantním proudem (Constant Current, dále jen CC) až do napětí 4,0 V/článek a po dosažení tohoto napěťového limitu se udržuje napětí akumulátoru na této hranici s postupným snižováním proudu až do proudu 0A (Constant Voltage, dále jen CV). Tuto metodu nabíjení článků budeme dále označovat jen jako CC -> CV. Vzhledem k tomu, že metoda CCM je kalibrována vždy při dosažení ukončovacího napětí pro nabíjení (v tomto případě 3,95 V/článek) a ne všichni uživatelé nechají akumulátor po ukončení práce plně nabít, je v testu nabíjecí proces ukončen fází CV na napětí 4 V/článek vždy jen každý pátý nabíjecí cyklus. V ostatních cyklech bylo nabíjení ukončeno fází CV při dosažení napětí 3,7 V/článek, 3,8 V/článek, 3,9 V/článek a 3,75 V/článek.

### 7.2.1.3 Výsledná testovací sekvence pro akumulátor Lukas StrongArm

Celková testovací sekvence metod odhadu SOC založená na profilu zařízení Lukas StrongArm byla sestavena podle tab. 3.

Tab. 3. Celková testovací sekvence Lukas StrongArm

Počet cyklů StrongArm	16	6	9	11	5
-----------------------	----	---	---	----	---

Čas pro vychlazení akumulátoru [min]	60	60	60	60	60
Nabíjecí proud [A]	8	4	5	3	6
Nabíjení ukončeno při napětí	3,7 V/čl.	3,8 V/čl.	3,9 V/čl.	3,75 V/čl.	4,0 V/čl.
Relativní vybitá kapacita [mAh]	-3464	-1299	-1949	-2382	-1083
Relativní nabitá kapacita [mAh]	+1830	+1717	+2291	+1850	+2489
Absolutní kapacita před přechodem do dalšího kroku testovací sekvence [mAh]	2166	2584	2926	2394	3800

## 7.2.2 Testovací sekvence pro akumulátor do elektro-kole značky Electrolyte a typu Vohrradler

Profil elektrokola byl do testovacích sekvencí vybrán z důvodu odlišného chování proudového zatížení. Chování kola s elektrickou asistencí jakožto elektronické zátěže pro akumulátor se vyznačuje velkou rychlostí změn velikosti a směru proudu tekoucího z (do) akumulátoru. Elektrokolo Vohrradler od firmy Electrolyte bylo zvoleno z důvodu asistenčního provozu. To znamená, že elektromotor dodává do kola energii pouze v případě, že uživatel sám působí silou na pedály kola. Na zvoleném elektro-kole tedy nelze jet „jako na motorce“. Uživatel má pouze možnost nastavit si procentuální asistenci elektromotoru. Ve středu pedálů je umístěn tenzometr snímající sílu působící na každý pedál. Řídící elektronika následně řídí elektromotor, který dodává 0 až 50 % síly dodané uživatelem. Tento způsob řízení elektromotoru vede opravdu k velkému „rušení“ na průběhu proudu. Toto kolo je zároveň vybaveno funkcí rekuperace kinetické energie na energii elektrickou, která je ukládána zpět do akumulátoru.

### 7.2.2.1 Popis elektro-kola Electrolyte Vohrradler

Parametry elektrokola jsou uvedeny v tab. 4. a elektrokolo je vyobrazeno na obrázku obr. 9.

Tab. 4. *Parametry elektro-kola Electrolyte Vohrradler*

Hmotnost elektro-kola	23kg
Maximální dojezdová vzdálenost s elektro asistencí	180km
Jmenovitý výkon instalovaného elektromotoru	250W
Konfigurace akumulátoru	10S5P (36 V / 14,5 Ah / 522 Wh)



Obr. 9. Elektro-kolo Electrolyte Vohrradler [12]

Akumulátor je vybaven magnetickým konektorem od firmy Rothenberger. V konektoru jsou dva výkonové kontakty pro napájení celého systému a čtyři kontakty signálové sloužící pro komunikaci s elektrokolem a probouzení akumulátoru z režimu spánku. Akumulátor komunikuje s řídicí jednotkou elektromotoru pomocí specializované sběrnice a pro přenos dat je využit protokol SMBus. Všechny důležité parametry akumulátoru jsou zobrazeny na velkém LCD displeji umístěném na řídítkách elektro-kola (viz obr. 10). Mezi těmito údaji jsou například: aktuální spotřebovávaná (případně rekuperovaná) energie, předpokládaná dojezdová vzdálenost s aktuální i průměrnou spotřebou, aktuální stav nabití akumulátoru a další podobné údaje. Je tedy nezbytné mít velmi přesný odhad aktuálního stavu nabití akumulátoru.



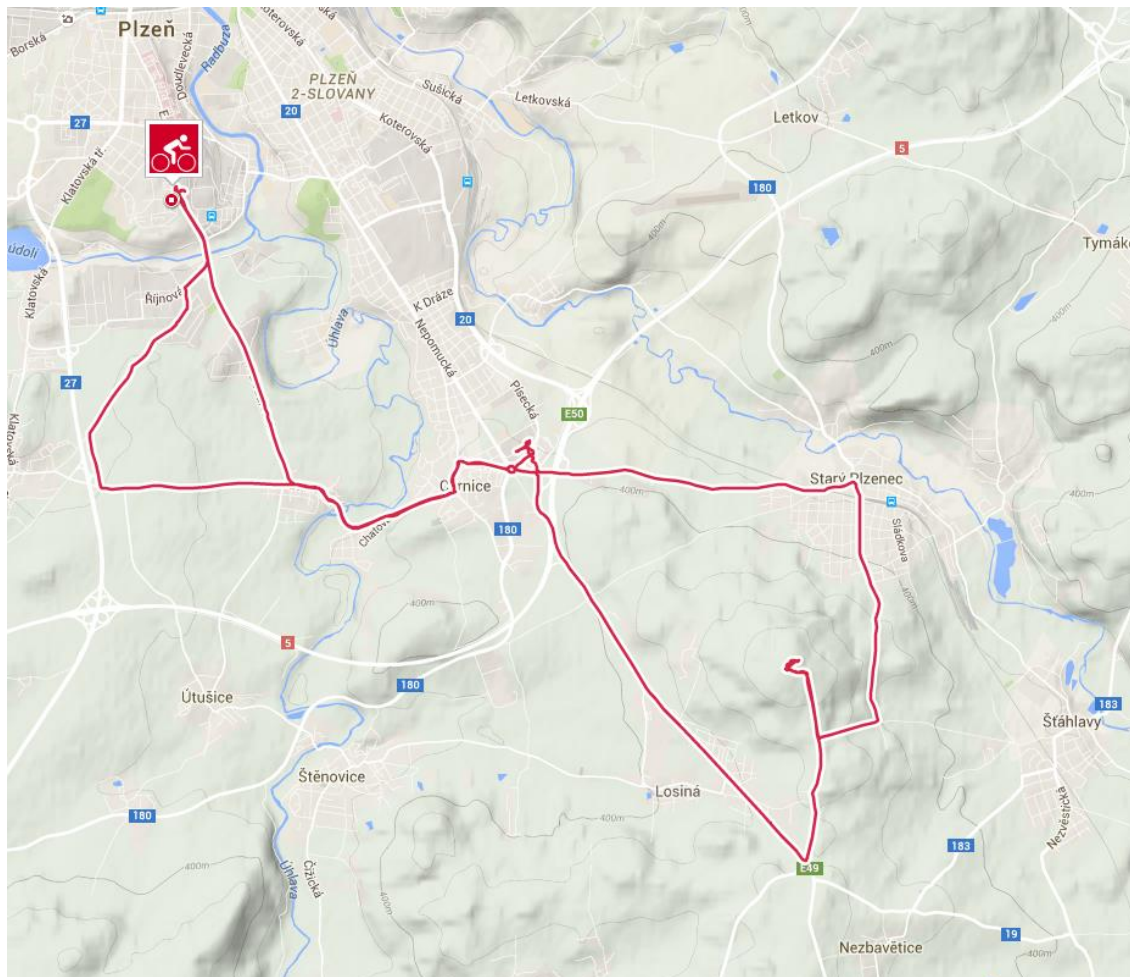
Obr. 10. Displej elektro-kola Electrolyte Vohrradler [13]

Požadované přesnosti nahrává chování proudu u elektrokola. Rozběhový proud elektro-kola je vzhledem k řízení BLDC motoru pozvolný a dosahuje hodnoty 10 A. Z toho vyplývá, že akumulátor musí být schopen měřit proudy v rozsahu +10 A (maximální nabíjecí proud při použití rychlé nabíječky) až – 30 A (limit pro vyhodnocení zkratu). Tento rozsah znamená při použití 12-ti bitového převodníku a jednoduchého obvodu pro snímání proudu rozlišovací schopnost přibližně 10 mA / bit. V případě elektroniky pro elektrokolo se tedy dá očekávat téměř zanedbatelné rušení na hodnotě proudu i napětí vstupujících do algoritmů odhadu SOC.



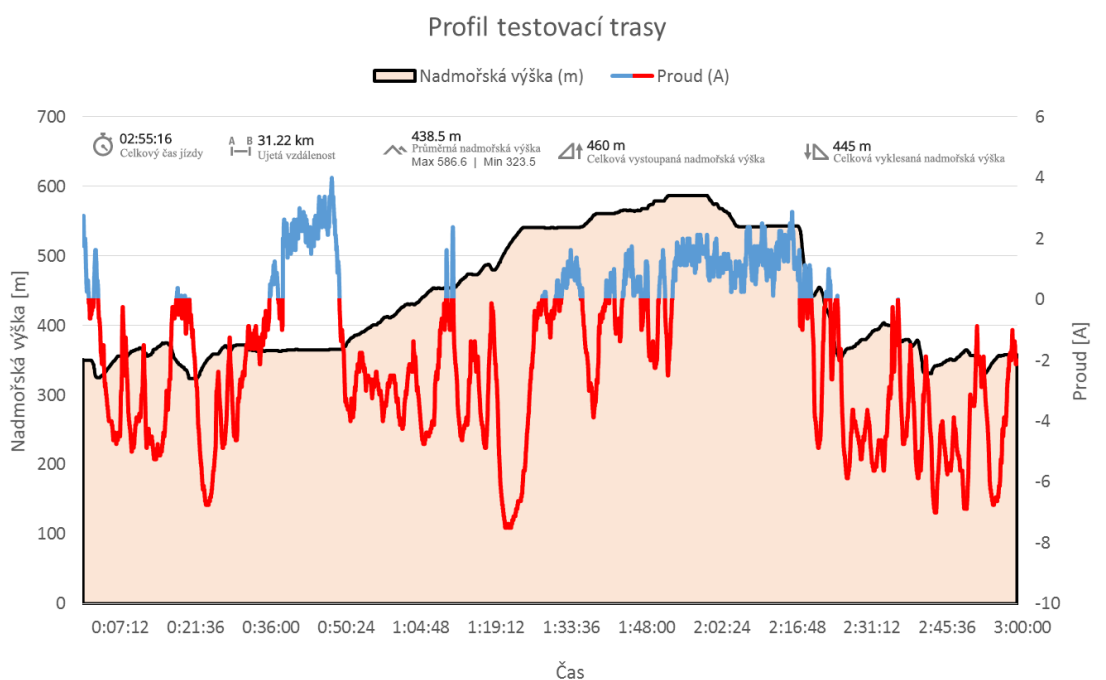
### 7.2.2.2 Popis testování

Profil pro testování metod odhadu SOC byl naměřen na trase vedoucí z Plzně na Radyni a zpět, viz obr. 11.



Obr. 11. Trasa pro získání testovacího profilu

Výškový profil testovací trasy, stejně jako trasa samotná, byl zaznamenán pomocí sport-testeru V800 vyrobeném firmou Polar [14]. Tento sport-tester obsahuje barometrický senzor a GPS přijímač, z čehož vyplývá relativně přesný záznam výškového profilu trasy. Proudový profil trasy byl zaznamenán pomocí speciálně vyvinutého zařízení pro logování průběhů teploty, napětí a proudu. Logovací zařízení bylo připojeno mezi elektrokolo a akumulátor. Výsledný testovací profil je vyobrazen na obr. 12 a zjednodušené parametry profilu jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 12. Výškový a proudový profil testovací trasy

Tab. 5. Průměrné hodnoty testovacího profilu elektro-kola Electrolyte Vohrradler

Čas testovací sekvence	Průměrný proud při rekuperaci	Průměrný proud při zátěži
2 hodiny a 55 minut	1,35 A	-3,23 A
Vzorkovací čas proudu	Celkový čas rekuperace	Celkový čas zátěže
10 ms	52 min a 13 sekund	120 minut a 28 sekund
Maximální rekuperační / vybíjecí proud	Relativní rekuperovaná kapacita	Relativní vybitá kapacita
4 A / -7,5 A	+1 177 mAh	-6 486 mAh
	Celková bilance akumulátoru v průběhu testu	
	-5 308 mAh	

Délka záznamu trasy byla zkrácena z důvodu zachování zbytkové kapacity v akumulátoru tak, aby bezpečně nedocházelo k vynulování SOC vlivem podpětí akumulátoru. U testovaného akumulátoru zároveň nesmí dojít k přehřátí článků, což by vedlo k nutnosti přerušení testu a mohlo by mít za následek zkreslení výsledků testu.

### 7.3 Výchozí podmínky pro testování metod odhadu stavu nabití

Je zřejmé, že pro dobrou porovnatelnost výsledků jednotlivých testů je nutné dodržet stejné počáteční podmínky akumulátoru a stejné klimatické podmínky po dobu trvání celého testu.

### 7.3.1 Počáteční podmínky pro akumulátory v testu

Pro všechny akumulátory v testu byly stanoveny následující podmínky:

- Akumulátor musí být vždy před počátkem testu nabitý na stejnou hodnotu napětí. Toto napětí bylo stanoveno na:
  - U akumulátoru Lukas StrongArm na 28 V  $\approx$  (4,00 V/článek).
  - U akumulátoru Electrolyte Vohrradler na 41,6 V  $\approx$  (4,16 V/článek).
- Před začátkem každého testu musí být zkontrolována shodnost napětí všech článků akumulátoru a články musí být v případě nutnosti zbalancovány. Za rozbalancované články se dají označit články při překročení rozdílu 20 mV ( $U_{CELL\ MAX} - U_{CELL\ MIN}$ ).
- Teplota akumulátoru před začátkem testu musí být shodná  $26\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .
- Akumulátor musí být při všech testech ve stejném krytu, ve kterém je distribuován pro konečného zákazníka.
- Každý test musí být proveden alespoň na pěti akumulátorech ze stejné série vybavených elektronikou vyrobenou ve stejné sérii a to tak, že třikrát pro každý akumulátor.
- Články musí být svařeny stejnou technologií, jaká je použita pro sériovou výrobu daného typu akumulátoru a musí být osazen stejnou elektronikou, jaká je použita pro sériovou výrobu.

Napětí akumulátoru před počátkem testu je docíleno pomocí nabíjení napájecím zdrojem, nikoliv standardní nabíječkou. Standardní nabíječka je vyráběna s ohledem na velmi nízkou cenu a její ukončovací napětí se pohybuje v řádu stovek milivoltů, což je pro porovnání úspěšnosti jednotlivých metod poměrně velká nepřesnost. Jako napájecí zdroj byl zvolen již zmíněný síťový zdroj EA-PSI 8160-60. Tento zdroj byl zvolen z důvodu obsazení v samotné testovací proceduře a snadného nastavení charakteristiky CC  $\rightarrow$  CV a velké přesnosti nastavených parametrů. Nabíjecí proud pro charakteristiku CC byl nastaven shodně s maximálním nabíjecím proudem originální nabíječky, tj. pro akumulátory Lukas StrongArm na 2,8 ampéru a pro akumulátory Electrolyte Vohrradler na 4,5 ampéru. Shodnost napětí všech článků akumulátoru byla potvrzena kalibrovaným měřicím přístrojem Fluke 115 [15]. Články nebylo nutné po celou dobu testu balancovat, neboť maximální naměřený rozdíl napětí jednotlivých článků byl 16 mV. Pro měření teploty akumulátoru byl každý akumulátor v testu vybaven dvěma teplotními senzory



umístěnými následovně. První senzor je umístěn na vnější straně akumulátoru na článku s nejnižším potenciálem. Druhý senzor teploty je pak umístěn uprostřed akumulátoru tak, aby nedocházelo k jeho ochlazení vlivem okolního prostředí.

Pro vyloučení chyby měření dané elektroniky musí být každý test proveden na nezávislých akumulátorech. Pokud se výsledky jednoho akumulátoru příliš odlišuje od výsledků akumulátorů ostatních, je tento akumulátor z testu vyřazen a nahrazen akumulátorem novým.

### **7.3.2 Klimatické podmínky v průběhu testu**

Klimatické podmínky byly nastaveny pomocí kalibrované průmyslové klimatické komory vyráběné firmou Clima Temperature Systeme pod označením CTS C -40/100. Tato komora má vnitřní objem 100 litrů a umožňuje nastavit teplotu v rozsahu od -40 do +180 °C [16]. Klimatické podmínky bylo nutné rozlišit podle jednotlivých aplikací akumulátorů, neboť oba akumulátory jsou předurčeny pro provoz v odlišném prostředí. Akumulátor určený pro zařízení Lukas StrongArm byl již od počátku vyvíjen pro extrémní použití a je schopen pracovat v teplotním rozsahu od -30 do +120 °C. Přičemž bezchybná funkce akumulátoru v zařízení Lukas StrongArm při teplotě +120 °C je garantována po dobu deseti minut. Zatímco funkce akumulátoru určeného pro elektrokolo je garantována v teplotním rozsahu -20 až +55 °C. S přihlédnutím na velice nízkou pravděpodobnost dlouhé vyjížďky v zimním období při teplotách nižších než 0 °C, byl volen klimatický test v rozmezí od 0 do +60 °C.

## **7.4 Průběhy testů akumulátorů**

### **7.4.1.1 Průběhy testů pro akumulátor Lukas StrongArm**

Podmínky testů pro akumulátor do záchranného zařízení Lukas StrongArm byly nastaveny tak, aby se co možná nejpřesněji blížily podmínkám reálného provozu. Test byl proto rozdělen do několika kroků. V prvním kroku testu byly akumulátory umístěny na 10 hodin do klimatické komory nastavené na teplotu -25 °C tak, aby došlo k ustálení teploty článků. Po deseti hodinách byly akumulátory ponechány v mrazicím boxu a byl spuštěn test dle kapitoly 7.2.1.3. V druhém kroku testu byly akumulátory dobity na stav plného nabití a ponechány v pokojové teplotě po dobu 10 hodin. Poté byl celý test dle kapitoly 7.2.1.3 zopakován. Ve třetí fázi testu byly akumulátory opět dobity na hodnotu plného nabití a ponechány jednu hodinu při pokojové teplotě. Následně byl vždy jeden

testovaný akumulátor vložen do klimatické komory nastavené na teplotu +100 °C. V této teplotě byl akumulátor ponechán bez zátěže po dobu 6 minut. Po uplynutí této doby byl akumulátor ponechán v klimatické komoře a byla spuštěna testovací sekvence skládající se z osmnácti pracovních cyklů zařízení Lukas StrongArm viz tab. 2. Ve čtvrté fázi testu byly akumulátory opět dobity do plného stavu (28 V) a ponechány v pokojové teplotě po dobu jedné hodiny. Následně byl vždy jeden testovaný akumulátor vložen do klimatické komory nastavené na teplotu +150 °C. V této teplotě byl akumulátor ponechán bez zátěže po dobu 10 minut. Následně byl akumulátor z klimatické komory vyjmut a byla spuštěna testovací sekvence skládající se z osmnácti pracovních cyklů zařízení Lukas StrongArm viz tab. 2. Pátá fáze testu byla navržena pro otestování přesnosti metod při konstantním výkonovém zatížení. Akumulátor byl před tímto testem opět plně nabit a ponechán 1 hodinu při pokojové teplotě. Poté byl akumulátor při pokojové teplotě zatížen jmenovitým výkonem motoru 1000 W po dobu 5 minut.

#### 7.4.1.2 Průběhy testů pro akumulátor Electrolyte Vorhrradler

Klimatické podmínky pro akumulátor do elektrokola byly také nastaveny tak, aby se co možná nejpřesněji blížily podmínkám reálného provozu. Test byl také rozdělen do několika kroků. V prvním kroku testu byly akumulátory umístěny na 10 hodin do klimatické komory nastavené na teplotu 0 °C tak, aby došlo k ustálení teploty článků. Po deseti hodinách byly akumulátory ponechány v klimatické komoře a byl spuštěn test dle naměřeného profilu, viz obr. 12. Ve druhém kroku testu byla klimatická komora nastavena na teplotu 26 °C a plně nabitý akumulátor (41,6 V) byl do ní umístěn na jednu hodinu. Po uplynutí aklimatizačního času byl celý test zopakován. Ve třetím kroku testu byla klimatická komora nastavena na teplotu 45 °C a aklimatizační čas byl zvýšen na 2 hodiny. Po dvou hodinách byl každý akumulátor vystaven naměřenému průběhu proudu, jako je na obr. 12. Čtvrtá fáze testu simuluje vystavení akumulátoru slunečnímu záření. Každý akumulátor je dobit a ponechán při pokojové teplotě po dobu 2 hodin. Následně je akumulátor vložen do klimatické komory nastavené na teplotu 65 °C a je spuštěn stejný test jako v předchozích bodech. Poslední fáze testu byla opět navržena pro otestování přesnosti metod při konstantním výkonovém zatížení. Akumulátor byl před tímto testem opět plně nabit a ponechán 1 hodinu při pokojové teplotě. Poté byl akumulátor při pokojové teplotě zatížen jmenovitým výkonem motoru elektro-kola 250 W po dobu 1 hodiny a 30 minut.

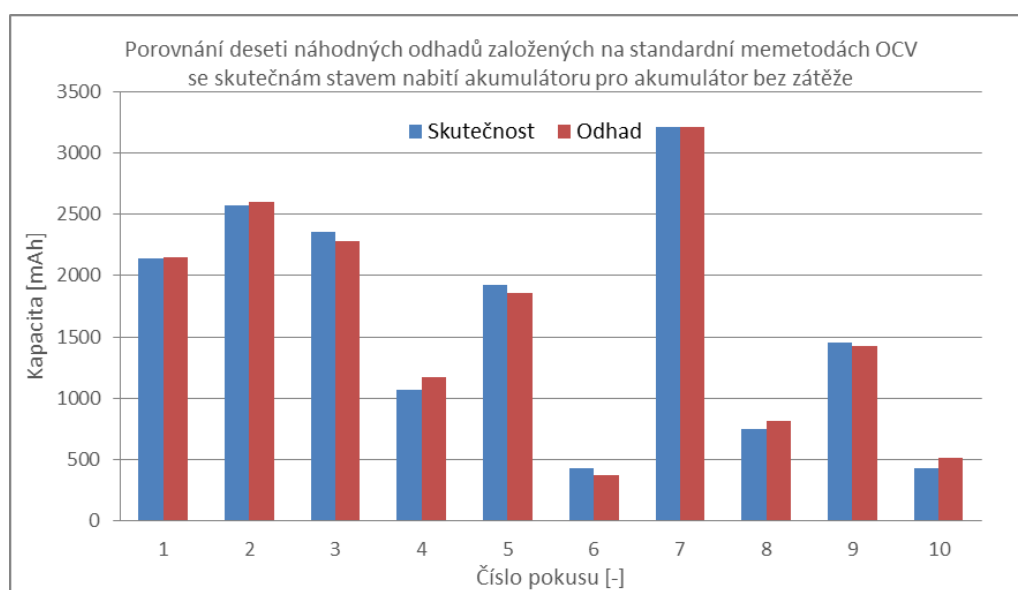
## 8 Postup při hodnocení výsledků testů metod odhadu stavu nabití akumulátorů

Při hodnocení výsledků jednotlivých metod odhadu SOC musí být brána v potaz přesnost laboratorních přístrojů použitých pro zkoumání jednotlivých metod. Proto jsou všechny výsledky vztažené ke kapacitě akumulátoru, která byla naměřena pomocí těchto laboratorních přístrojů, nikoli ke katalogovým hodnotám. Katalogové hodnoty pro jednotlivé články mohou být mírně odlišné od reálných článků i z důvodu zakoupení článků jiné jakosti než první. Jakost je na člancích uvedena pomocí písmene A ÷ F. Písmeno A označuje článek první jakosti a písmeno F pak označuje článek nejhorší možné jakosti. Z porovnání parametrů článků ze třídy A s parametry článků spadajících do třídy F vyplývá, že maximální rozptyl kapacity a vnitřního odporu je 5 %. Rozdíl v napětí nového nepoužitého článku může být maximálně 100 mV.

### 8.1 Zhodnocení výsledků akumulátorů do zařízení Lukas StrongArm

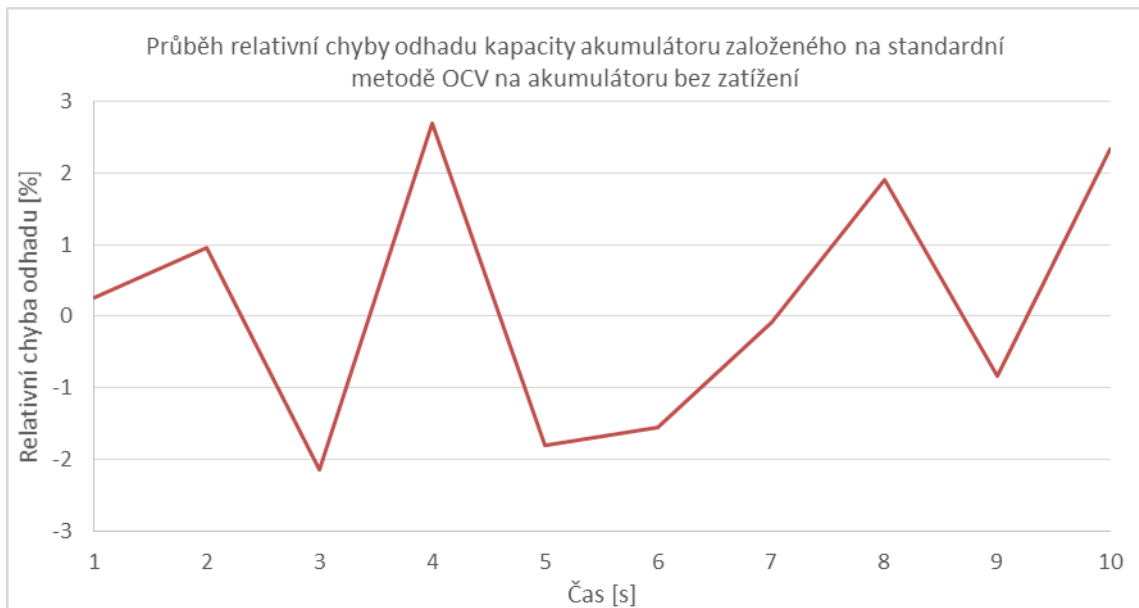
#### 8.1.1 Metoda odhadu stavu nabití založeného na měření napětí nezatíženého článku

Standardní metoda odhadu z napětí nezatíženého článku se anglicky nazývá Open Circuit Voltage (dále jen OCV). Tato metoda je pro toto zařízení použitelná pouze pro stanovení počáteční hodnoty SOC, neboť v pracovním cyklu tohoto zařízení není dostatečně dlouhá doba bez proudového zatížení akumulátoru. Odhad počátečního stavu nabití akumulátoru pomocí standardní metody OCV je vyobrazen na grafu na obr. 13.



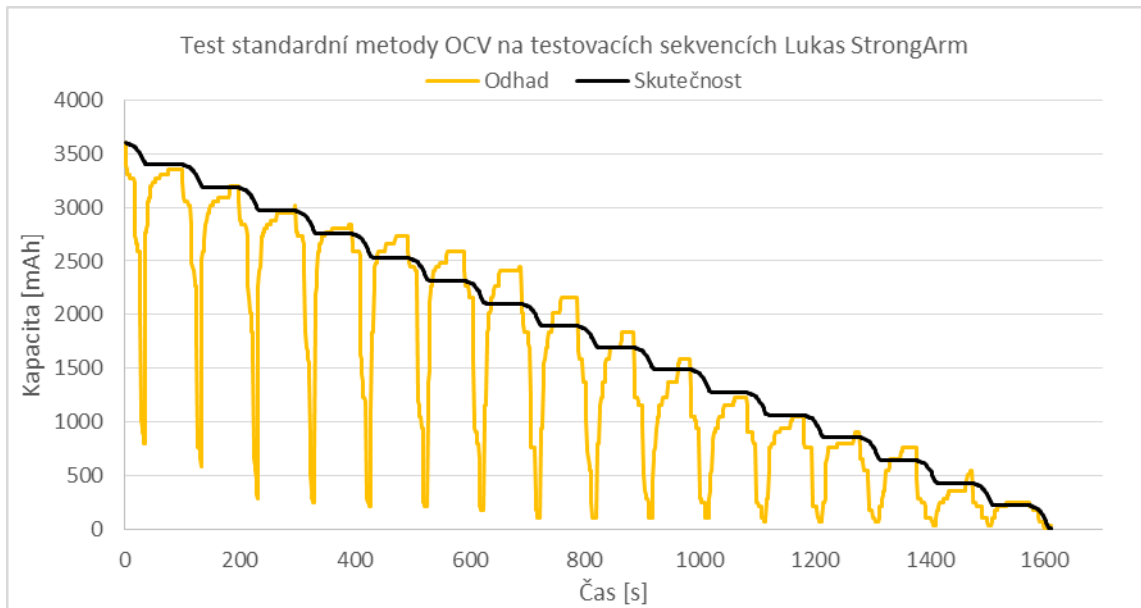
Obr. 13. Odhad klidové hodnoty SOC pomocí standardní metody OCV,

Z grafu plyne, že tato metoda má pro klidový stav akumulátoru opravdu velkou úspěšnost. Průběh relativní chyby při testování této metody je vyobrazena na obr. 14.



Obr. 14. Průběh relativní chyby odhadu SOC pomocí metody OCV pro akumulátor v klidovém stavu.

Z průběhu relativní chyby této metody vyplývá, že je tato metoda použitelná pro klidový odhad stavu nabití akumulátorů a porovnání kondice jednotlivých sériově řazených článků v akumulátoru. Výsledek dlouhodobého porovnávání SOC jednotlivých článků v akumulátoru, získaného metodou OCV, může být použit pro potřeby balancování článků za účelem docílení minimálního rozdílu stavu nabití jednotlivých článků v akumulátoru. Na obrázku obr. 15 je zobrazen průběh odhadu kapacity akumulátoru pomocí standardní metody OCV v průběhu pracovních cyklů. Tento průběh byl odměřen pouze pro orientační přehled chování standardní metody OCV v průběhu pracovního cyklu zátěže.

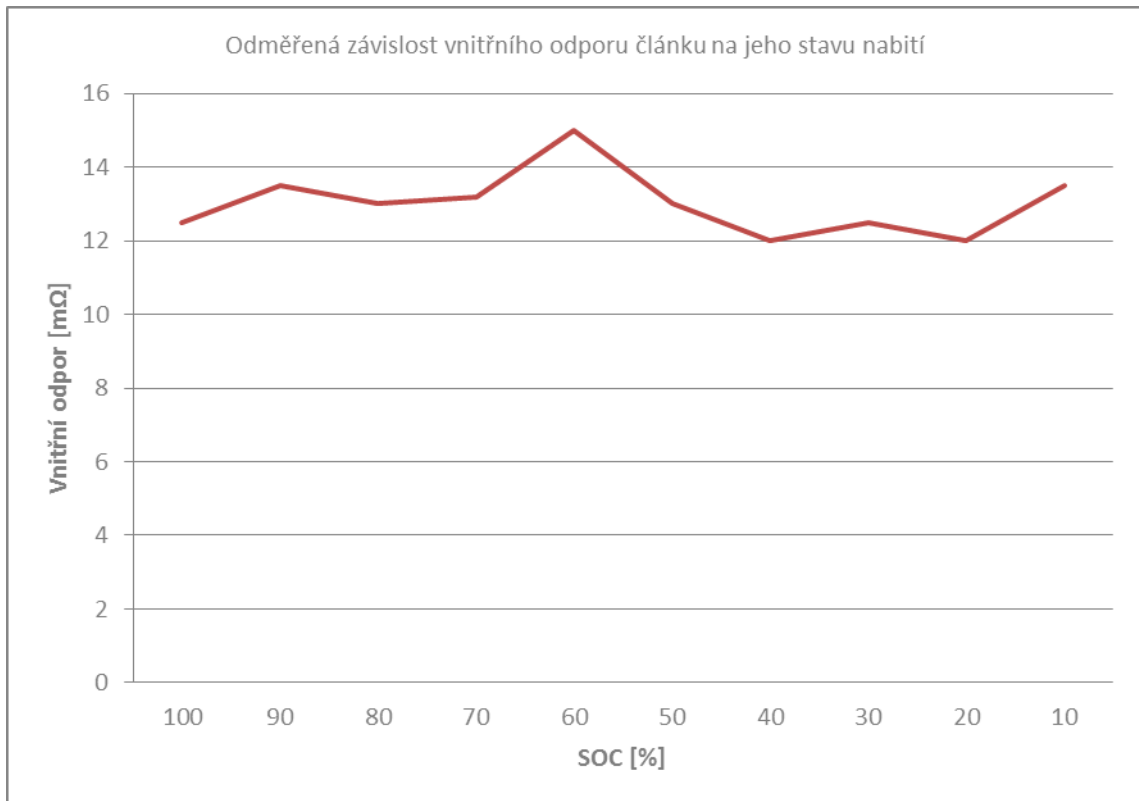


Obr. 15. Průběh odhadu pomocí standardní metody OCV na testovacích sekvencích Lukas StrongArm

Z průběhu je patrná velká chyba odhadu, která přesáhla úroveň 75 %. Průměrná chyba tohoto odhadu pak odpovídá přibližně 10 %. Velikost relativní chyby metody odhadu stavu nabití pomocí napětí nezatíženého článku na zatíženém článku zároveň metodu vyřazuje z takového využití. Oba výsledky této metody naplnily všechna očekávání. Testy této metody zároveň prokázaly možnost rychlého porovnání kondice a stavu nabití jednotlivých článků (paralelních skupin článků) v akumulátoru. Tyto údaje není možné zjistit za pomoci jiné konvenční metody buď vůbec, nebo pouze za dlouhodobého pozorování jednotlivých článků.

### 8.1.2 Metoda odhadu stavu nabití založená na sledování změny vnitřního odporu článků

Metoda BIR byla testována na stejných sekvencích jako předchozí metody. Přes veškeré úsilí, které bylo vynaloženo, nebylo bohužel možné získat věrohodné výsledky potvrzující funkčnost této metody. Pomocí této metody byla prokázána pouze závislost vnitřního odporu článků na jejich teplotě. Velikost vnitřního odporu článků v závislosti na SOC je uvedena na obr. 16.



Obr. 16. Závislost vnitřního odporu článku na jeho stavu nabití

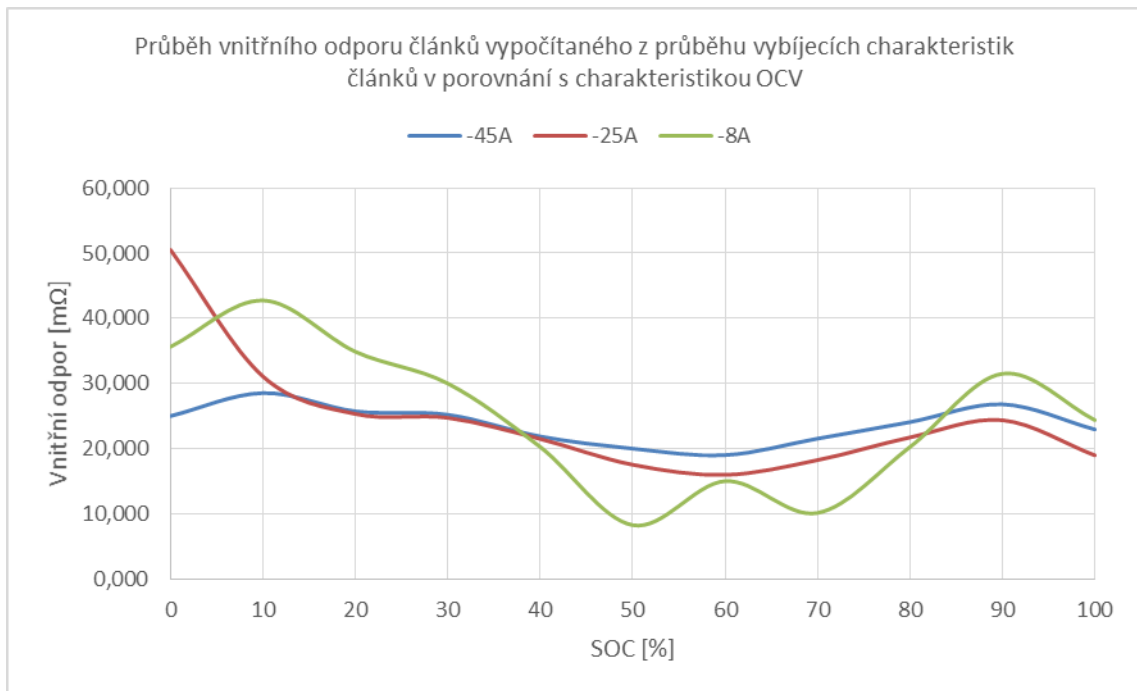
Změnu hodnoty vnitřního odporu článku je možno přisuzovat chybě měření elektroniky, neboť do přesnosti této metody vstupuje jak přesnost obvodu pro měření napětí, tak i přesnost obvodu pro měření proudu. Za účelem zkoumání této metody byl proveden test závislosti pomocí osciloskopu za použití přesné proudové sondy a napěťové sondy. Bohužel ani údaje z tohoto „laboratorního“ testu nebyly průkazné. Tuto metodu můžeme proto z metod odhadu kapacity vyloučit.

Průběh vnitřního odporu článků lze rovněž odvodit pomocí Ohmova zákona při porovnání charakteristik OCV a vybíjecích charakteristik pro proudy -45, -25, -8 A a charakteristik pro nabíjecí proudy +4 a +8 A. Vzorec pro výpočet vnitřního odporu článků plynoucí z porovnání charakteristik pro vybíjecí proud -25 A a SOC 0 % je v rovnici (7).

$$\begin{aligned}
 R_{IN\left[\frac{0\%}{25A}\right]} &= \frac{(U_{OCV[0\%]} - U_{-25A[0\%]}) \cdot N}{I \cdot 1000} \\
 &= \frac{(2,998 - 2,577) \cdot 3}{25 \cdot 1000} \quad (7)
 \end{aligned}$$

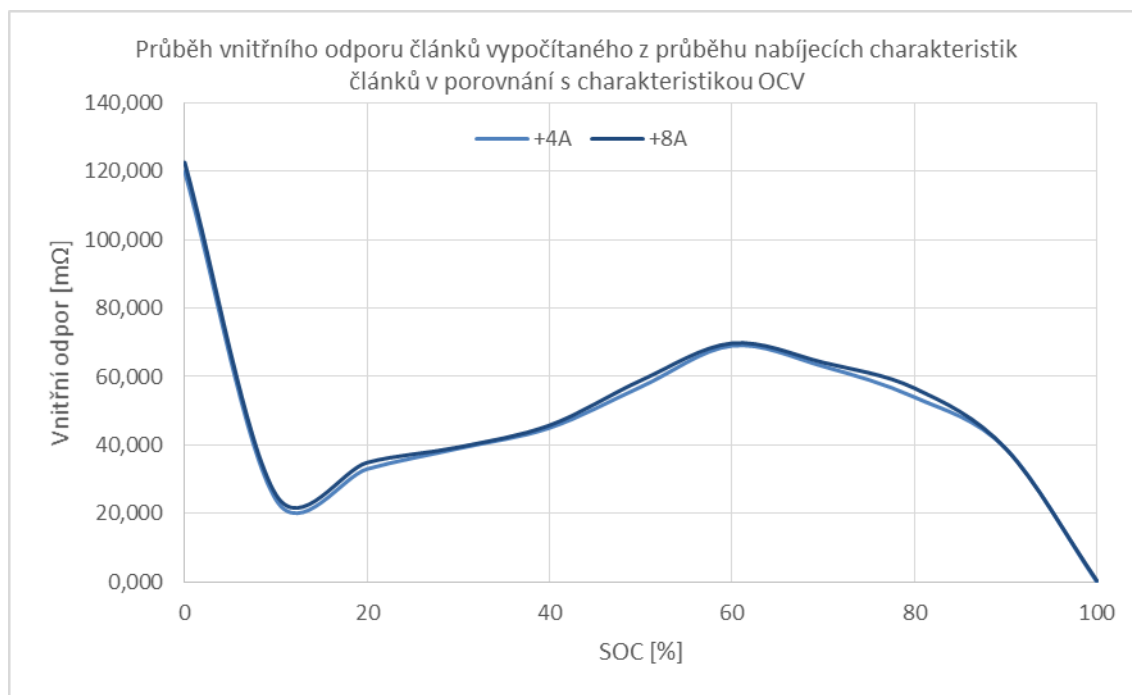
$$R_{IN\left[\frac{0\%}{25A}\right]} = 50,520 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Kde je  $U_{OCV[0\%]}$  napětí článku na prázdko při vybitém stavu,  $U_{-25A[0\%]}$  napětí článku při zatížení 25 A a vybitém stavu,  $N$  počet článků propojených v paralelní kombinaci,  $I$  proud odebíraný z článku a  $R_{IN[0\%]}^{[25A]}$  vnitřní odpor vybitého článku při odběru 25 A. Průběh vnitřního odporu článků vyplývající z vybíjecích charakteristik je na obr. 17.



Obr. 17. Průběh vnitřního odporu článků při vybíjení různými proudy

Ani v případě porovnání vybíjecích charakteristik nebylo možné prokázat znatelné zvýšení vnitřního odporu článků při poklesu stavu nabití. Průměrná hodnota vnitřního odporu článků v průběhu vybíjení pak dosahuje hodnoty 24 mΩ. Při pohledu na průběh vnitřního odporu článků v průběhu nabíjení (viz obr. 18) získáme výsledek odlišný. V tomto případě je naopak změna vnitřního odporu při přiblížení se limitu hlubokého vybití značná. Vnitřní odpor v tomto bodě dosahuje hodnoty přibližně 120 mΩ, což je oproti průměrné hodnotě 50 mΩ přibližně zdvojnásobení. Při překročení 60 % nabití je hodnota vnitřního odporu článků zkreslena přechodem z nabíjecí metody CC do metody CV.



Obr. 18. Průběh vnitřního odporu článků při nabíjení různými proudy

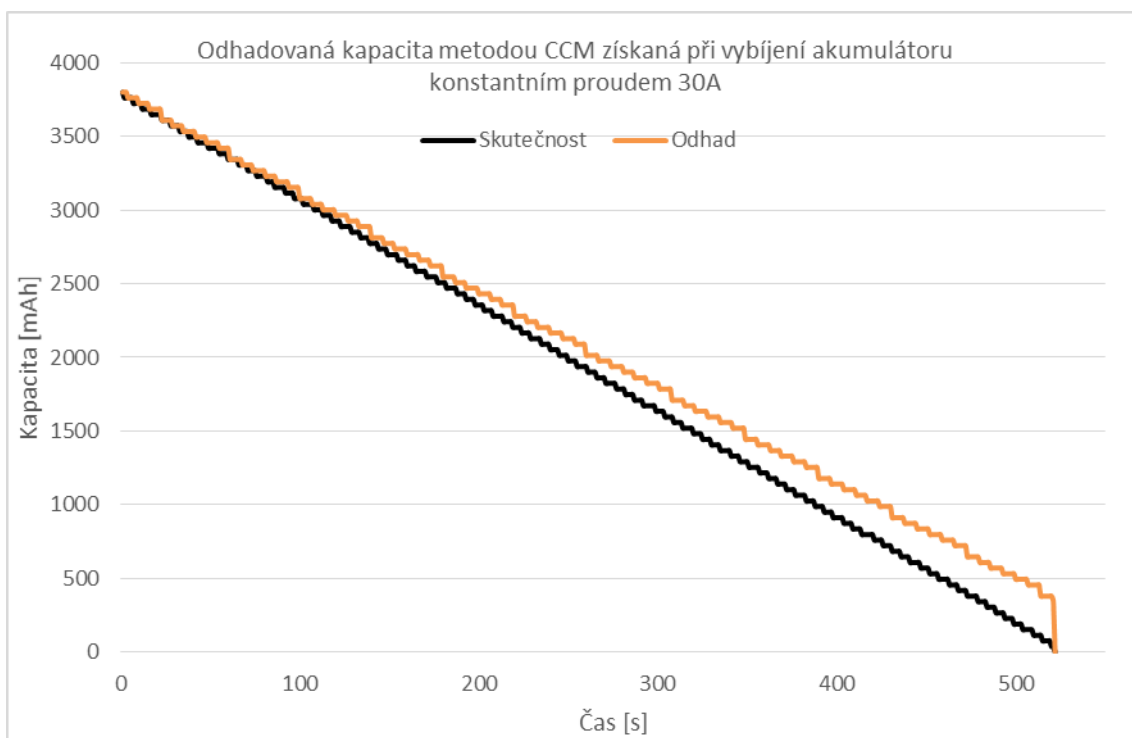
Z průměrných hodnot vnitřního odporu při nabíjení a vybíjení je patrné chování popsané v kapitole 6.5 na obr. 3. Zároveň lze takto naměřené hodnoty vnitřního odporu použít do metody MOCV jako hodnoty vnitřního odporu článků a tím pádem zrychlit nebo dokonce zcela eliminovat proces získávání křivek pro MOCV. Výsledná křivka se v tomto případě obdrží z křivky pro standardní OCV, kde se jako vstupní parametr do tabulky zadá aktuální naměřené napětí akumulátoru s přičteným, respektive odečteným úbytkem napětí na vnitřním odporu akumulátoru v závislosti na aktuálním procesu (nabíjení nebo vybíjení).

### 8.1.3 Metoda odhadu stavu nabití pomocí integrace proudu

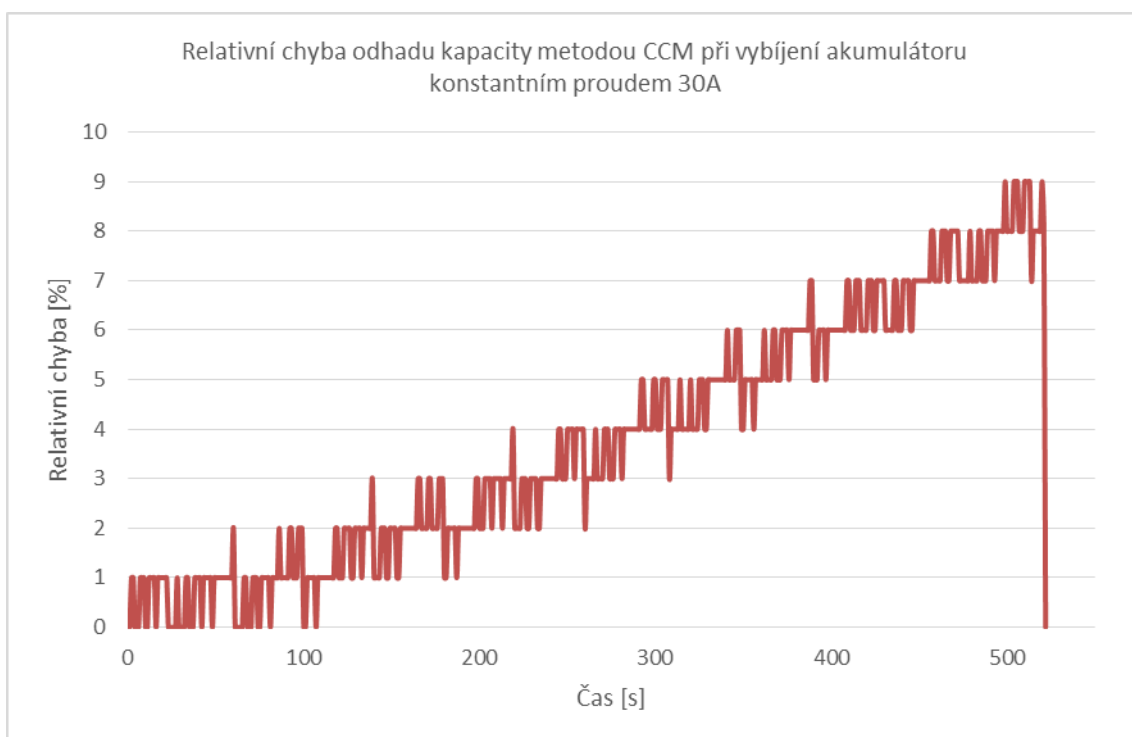
Aby byly výsledky této metody nezkreslené, byl počáteční stav nabití vždy kalibrován pouze při plném dobití akumulátoru, případně vybití akumulátoru do stavu hlubokého vybití. V ostatních případech je počáteční stav vyčten z paměti a pokračuje se tak od naposledy naintegrované hodnoty kapacity. Dá se tedy předpokládat, že tato metoda bude při samostatném použití náchylnější na chybu offsetu obvodu pro měření proudu a chybě následných přepočtů hodnot z AD převodníku. Pro správnou funkci metody je nezbytná kalibrace systému pro měření proudu. Kalibrace nelze provádět na každém sériově vyrobeném akumulátoru. Pro správnou kalibraci měření proudu bylo proto nabito deset akumulátorů na plnou kapacitu a po ustálení teploty na hodnotě 26 °C byly akumulátory vybity do stavu hlubokého vybití konstantním proudem 30 A.



Průměrný průběh odhadovaného stavu nabití a jeho relativní chyby v průběhu kalibračního procesu je na obr. 19 a obr. 20.



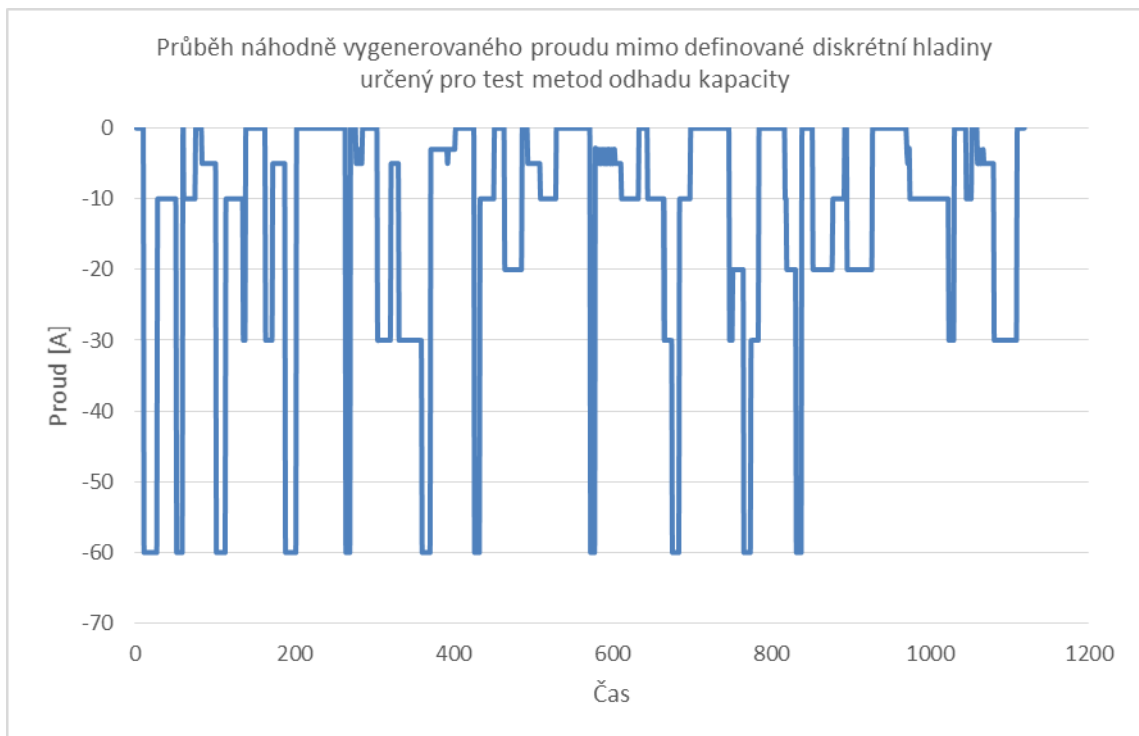
Obr. 19. Korekční křivka  $SOC_{CCM}$  získaná při měření konstantním proudem



Obr. 20. Průběh relativní chyby metody CCM při odběru konstantního proudu 30A z akumulátoru.

Maximální naměřená odchylka stavu nabití pro korekci této metody při konstantním proudu byla 9 %. Metoda byla dále za stejných počátečních podmínek otestována průběhem náhodného proudu generovaného elektronickou zátěží řízené pomocí PC a náhodný vygenerovaný průběh proudu je zobrazen na obr. 21. Parametry náhodného výběru byly nastaveny následujícím způsobem:

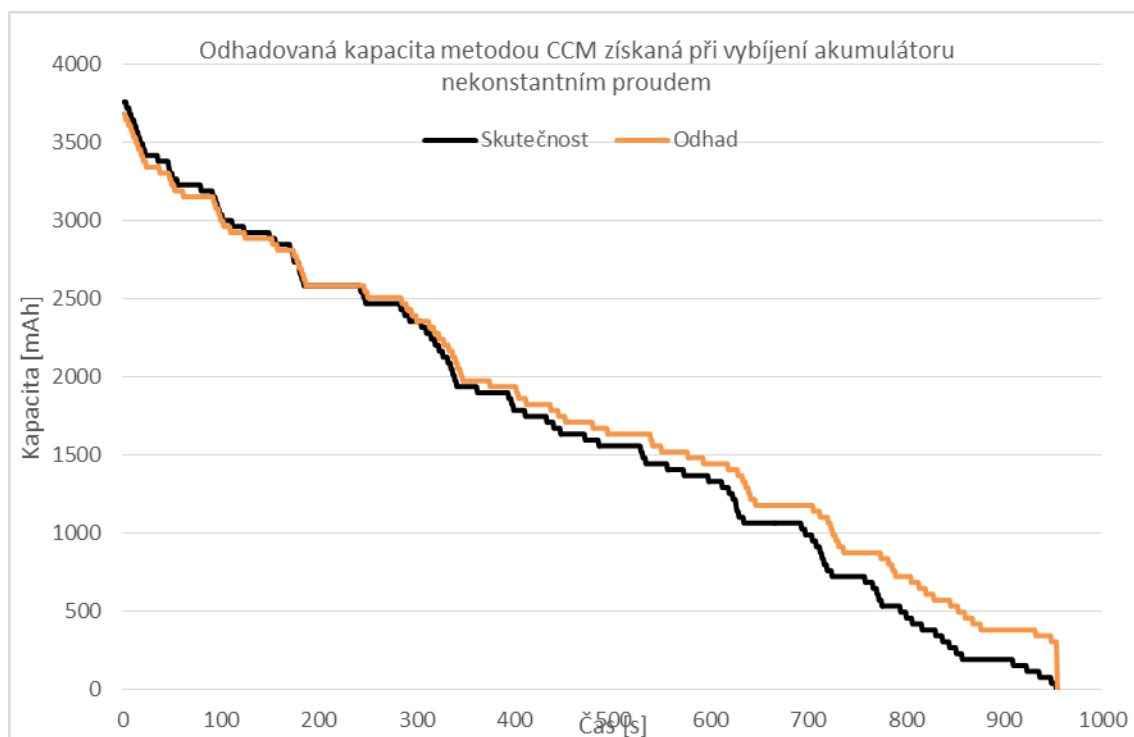
- Bylo zvoleno 8 diskretních hladin proudu (0, 1, 3, 5, 10, 20, 30 a 60 A)
- Čas pro přechod na další náhodnou hladinu byl nastaven v náhodném časovém intervalu z rozpětí 500 ms až 30 s.



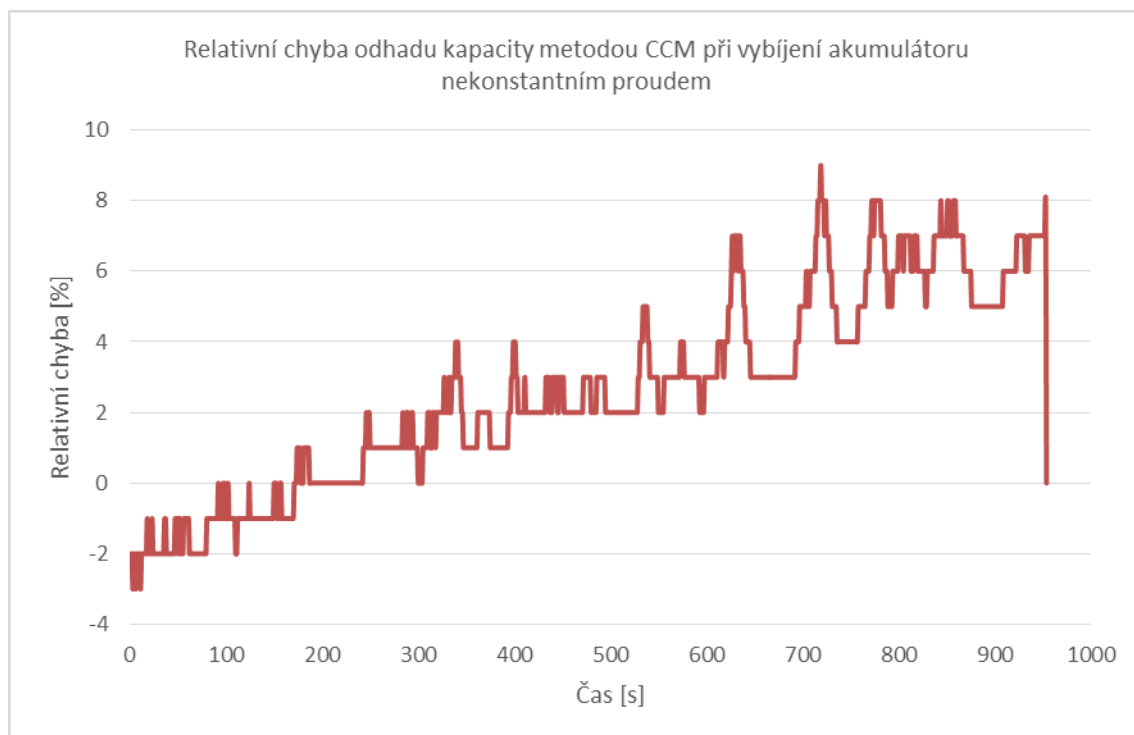
Obr. 21. Náhodně vygenerovaný průběh proudu mimo definované diskretní hladiny a jejich toleranční pásma

V případě nekonstantního proudu byla zjištěna stejná maximální chyba metody. Z průběhu relativní chyby při nekonstantním proudu je ovšem vidět závislost změny relativní chyby na velikosti proudu odebíraného z akumulátoru. Tato závislost je způsobena změnou zemního potenciálu BMS vlivem velkého proudu, závislostí hodnoty měřicího rezistoru na jeho teplotě měnící se vlivem velkého měřeného proudu a v neposlední řadě absencí jednotky Floating Point Unit (dále jen FPU) v procesoru tedy přepočtem skutečného proudu tekoucího z (do) akumulátoru pomocí fraktální aritmetiky. Tato aritmetika je sice v mikroprocesoru bez FPU rychlejší, je ale vykoupena diskretizací výsledného proudu. Rozestup diskretních hladin proudu je určen řádem fraktální aritmetiky, který závisí na maximálním rozsahu proměnných použitých pro výpočet

proudu a maximální stanovenou přípustnou chybou výpočtu. Jelikož je výsledný průběh stavu nabití získán integrací takto získaného proudu, je patrné, že i malá chyba proudu integrovaná po dlouhou dobu se stává chybou velkou. Průběh odhadu při nekonstantním proudu je vyneseno do grafů na obr. 22. a obr. 23.

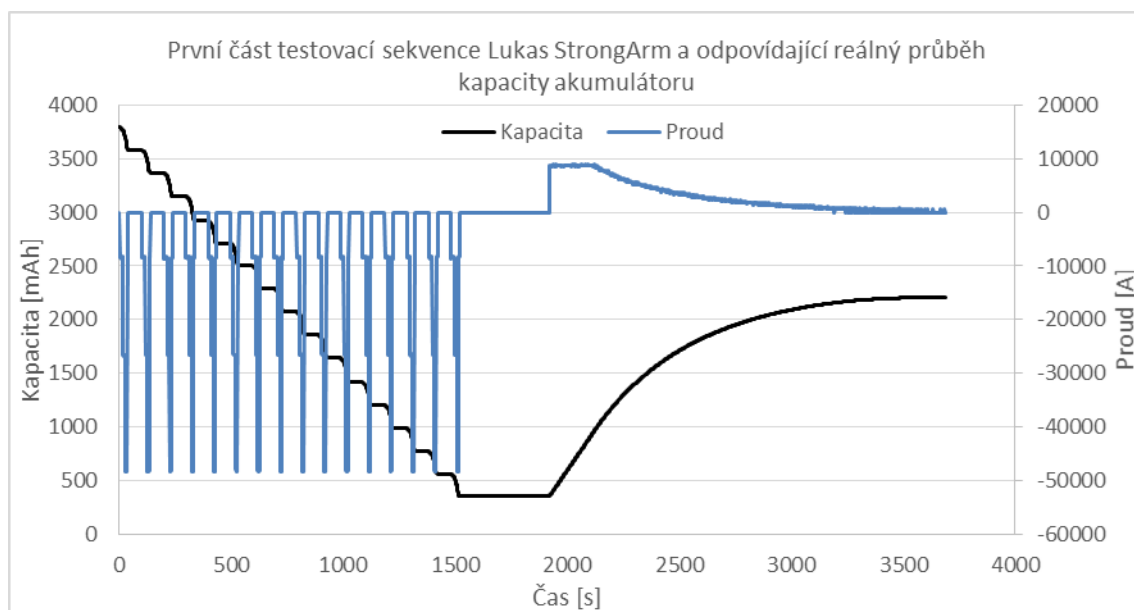


Obr. 22. Korekční křivka  $SOC_{CCM}$  získaná při měření nekonstantním proudem

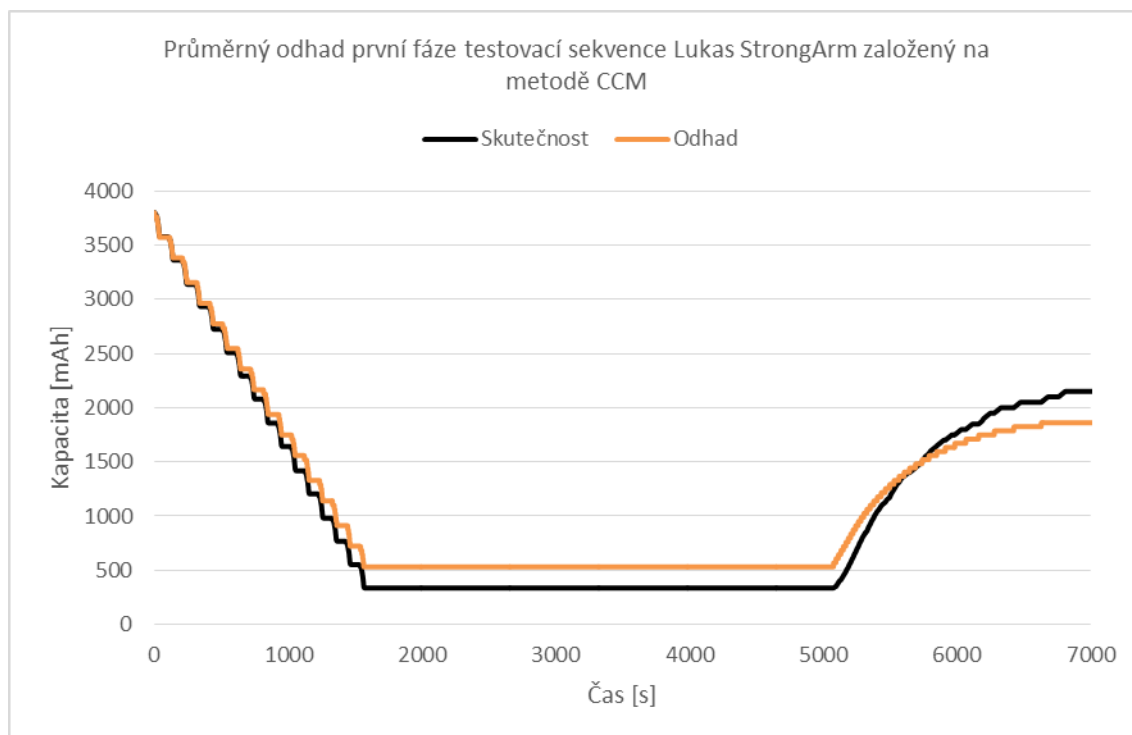


Obr. 23. Průběh relativní chyby metody CCM při odběru nekonstantního proudu z akumulátoru.

Předpokládaný (matematicky vypočtený) průběh odhadu kapacity v průběhu první části testovací sekvence Lukas StrongArm dle kapitoly 7.2.1.3 a zároveň výsledek naměřený elektronickou zátěží EA-EL 9160-300 a elektronickým zdrojem EA-PSI 8160-60 je na obrázku obr. 24 a následné srovnání s odhadem založeným na metodě CCM je na obr. 25.

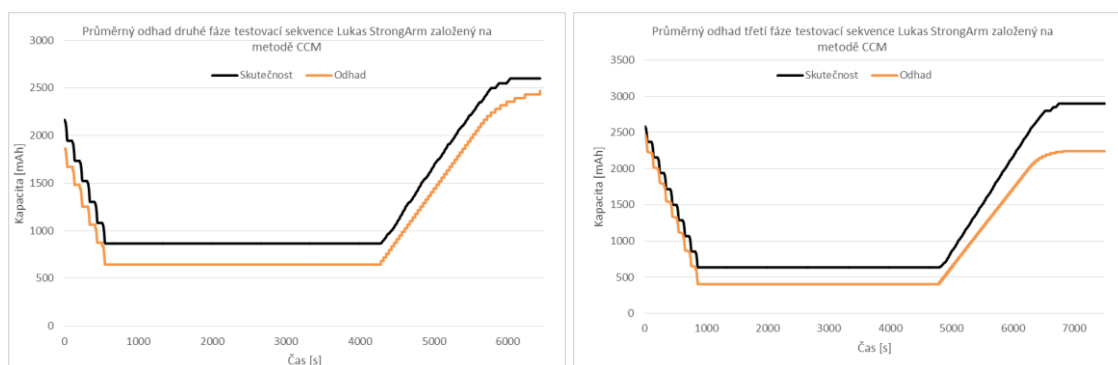


Obr. 24. Matematický výsledek první části testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3

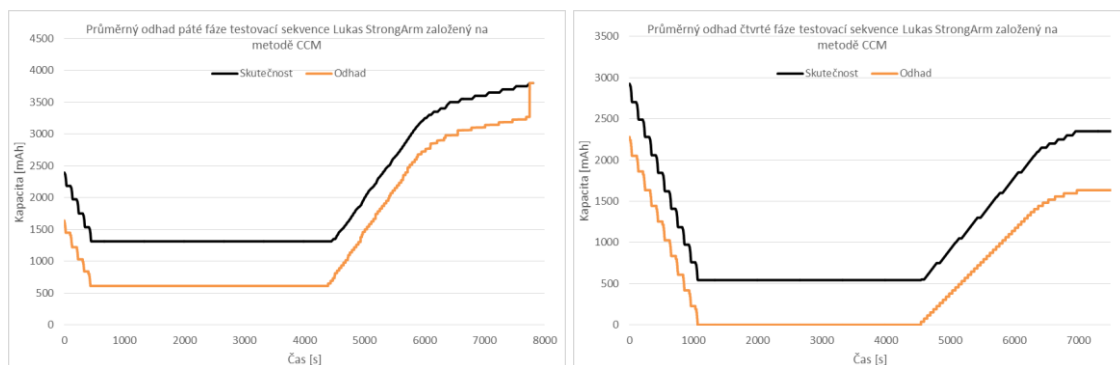


Obr. 25. Srovnání výsledku odhadu metodou CCM s matematickým výsledkem první fáze testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3

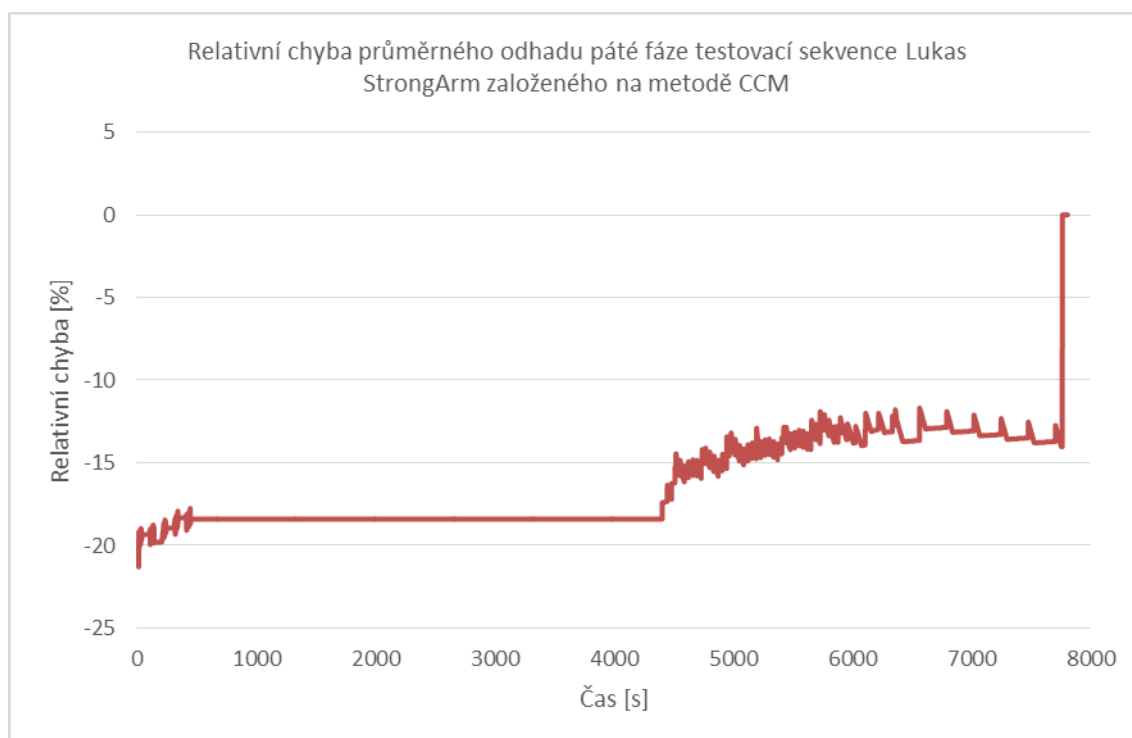
Průměrná hodnota relativní chyby v průběhu vybíjení v první fázi testovací sekvence a tedy po prvních osmnáct pracovních cyklů zařízení dosáhla +3% a maximální hodnota této chyby dosáhla +5 %. Tato chyba je přesně na mezi přípustnosti. Z průběhu je ovšem patrné, že již při následujícím cyklu zařízení by metoda opustila předepsanou mez chybovosti. Při nabíjení naopak vznikla vlivem integrace záporná chyba, která při ukončení nabíjecího procesu dosáhla hodnoty -8 %. Vzhledem k tomu, že není proveden odhad počátečního stavu nabití před další fází testu (například pomocí metody OCV), pokračuje test v další fázi od této naintegrované hodnoty. Výsledky odhadu v dalších fázích testu jsou na obr. 26 a obr. 27.



Obr. 26. Srovnání výsledku odhadu metodou CCM s matematickým výsledkem druhé a třetí fáze testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3



Obr. 27. Srovnání výsledku odhadu metodou CCM s matematickým výsledkem čtvrté a páté fáze testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3



Obr. 28. Průměrná relativní chyba metody CCM při páté fázi testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3

Ze s hora uvedených grafů lze vyvodit následující závěry. Po celou dobu druhé fáze testovací sekvence přesahovala maximální i průměrná chyba stanovenou mez přesnosti. Hodnota relativní chyby se v průběhu vybíjecí fáze snížila z počátečních -8 % na -6 %. Hodnota relativní chyby ovšem poklesla pod stanovené mezi teprve při fázi nabíjení, po jejímž dokončení dosahovala přijatelné hodnoty -3%. Přesto, že byla hodnota relativní chyby v této fázi testu vrácena do akceptovatelných mezí, vyvstává otázka, zda je tento posun správný. Pro nalezení odpovědi musíme umístit počátek testovací sekvence na hodnotu 0%. Tento posuv prozradí, že i v této fázi testu by hodnota relativní chyby skončila přesně na stanovené mezi přesnosti. Dalo by se proto říci, že v této fázi testu by bylo možné dodržet požadavek na stanovenou přesnost odhadu.

V následujícím kroku testovací sekvence se maximální relativní chyba odhadu zvětšila o dalších 9 %. Kumulativní chyba tak po třetí fázi testovací sekvence dosáhla hodnoty 18 %. Metoda CCM tak ani v této fázi testu nevyhověla počátečním požadavkům na přesnost odhadu. Vzhledem k nárůstu hodnoty relativní chyby o 9% můžeme s klidem konstatovat, že v této fázi testu by metoda nesplňovala počáteční kritéria přesnosti odhadu ani při posunutí počátku odhadu na správnou hodnotu. Po čtvrté fázi testovací sekvence (tedy po dalších jedenácti cyklech zařízení) se hodnota relativní chyby zvětšila na čtyřnásobek povolené hodnoty. Tato odchylka je opravdu nepřijatelná, a již v této fázi testu lze konstatovat, že metoda CCM je bez kombinace s jinou metodou pro přerušovaný provoz (bez dokončení nabíjecího procesu) prakticky nepoužitelná.

Odhad kapacity akumulátoru pomocí metody CCM nevyhověl stanoveným požadavkům na přesnost. Maximální chyba této metody naměřená v průběhu všech pěti fází testovací sekvence byla 21%. Průměrná chyba této metody v průběhu celé testovací sekvence dosáhla hodnoty 10 %. Velikost chyby této metody plyne z již zmíněného integrálního principu dané metody. Integrační chyba této metody je odstraněna teprve při dosažení kalibračního napětí, které bylo v tomto případě nastaveno na 3,95 V/článek (27,65 V/akumulátor). Po dosažení tohoto napětí se SOC nastaví na 100 %, čímž vznikne kladná chyba, neboť skutečný stav nabití je v tuto chvíli o pár procent nižší. Tato chyba je ovšem automaticky odstraněna při ukončení nabíjení akumulátoru na hodnotě napětí 4,0 V/článek (28 V/akumulátor). Limit 3,95 V/článek byl zvolen z důvodu bezpečného dosažení napětí při zohlednění tolerance napěťového měřicího obvodu v nabíječce i akumulátoru.

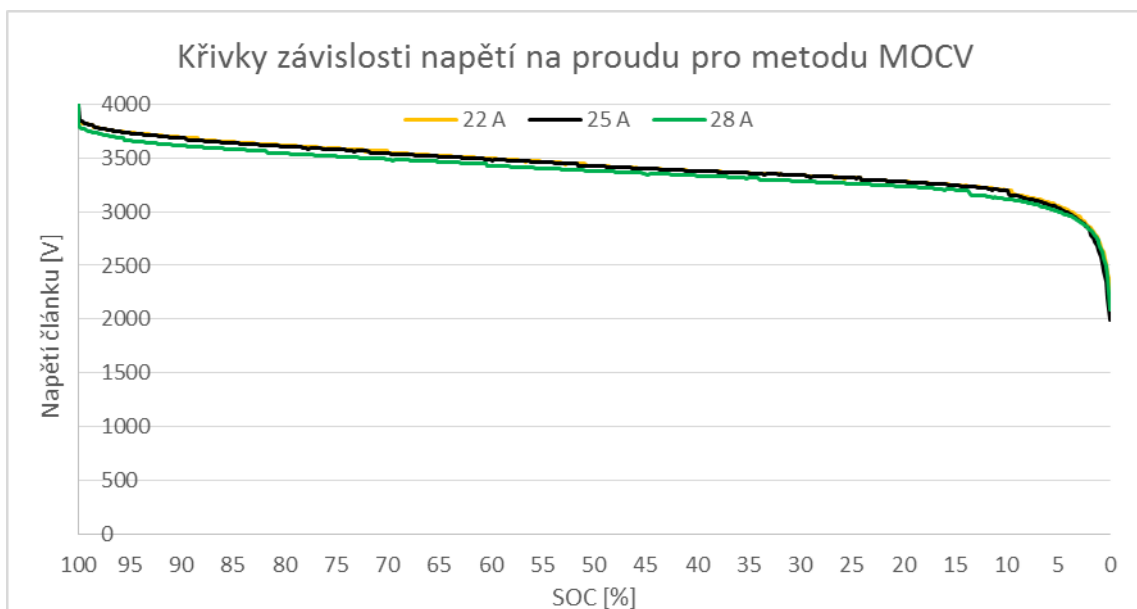
Při teplotních testech akumulátoru byla zjištěna poměrně velká chyba měřeného proudu. S přírůstkem teploty plošného spoje dochází k postupnému nárůstu offsetu obvodu pro měření proudu z počáteční hodnoty 0 ampér až na +3 ampéry. Z tohoto důvodu musela být hodnota proudu v mikroprocesoru teplotně kompenzována. Kalibrace offsetu probíhá ve fázi nulového proudu za krátkodobého rozepnutí výkonových MOS-FET tranzistorů.

#### **8.1.4 Příprava nově navržené metody odhadu stavu nabití z napětí zatíženého článku**

Aplikaci této metody není možné najít na internetu ani v žádné publikaci. Dále není možné dohledat žádný bližší popis chování této metody. Tato fakta byla důvodem, proč

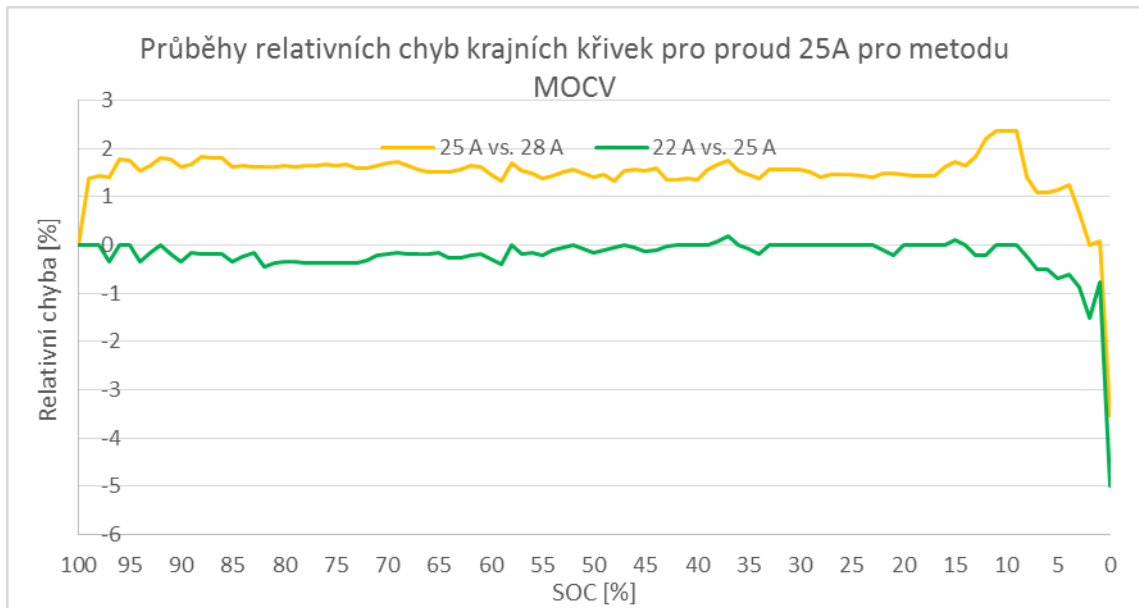
byla aplikace této metody zvolena. Na tuto metodu a pro danou aplikaci akumulátoru je kladen cíl dosáhnout chybovosti odhadu pod 5% v celém průběhu kapacity akumulátoru a to v každém okamžiku, kdy může být stav nabití kontrolován uživatelem.

Pro zdárnou aplikaci MOCV bylo nutné vyhodnotit pravděpodobné proudové hladiny a jejich tolerance. Stanovení pravděpodobných proudových hladin pro zařízení Lukas StrongArm plyne z tab. 2. Mimo proudových hladin vyplývajících z profilu zařízení je nutné dodat tabulky pro kladné (nabíjecí) proudy. V případě akumulátorů pro zařízení Lukas se jedná o dvě nabíjecí proudové hladiny a to +4 A pro standardní nabíječku a +8 A pro výkonnější nabíječku. Údaj maximální předpokládané relativní chyby odhadu v rámci tolerančního pásma získáme porovnáním vybíjecí (nabíjecí) křivky a obou křivek na krajích tolerančního pásma (worst cases), tj. například pro diskretní proudovou hladinu -25 A bylo zvoleno toleranční pásmo  $\pm 3$  A. Z tohoto tolerančního pásma plyne nutnost odměřit křivky závislosti stavu nabití na napětí pro proudy -22 A, -25 A a -28 A. Výsledné naměřené křivky jsou znázorněny na obr. 29. Z průběhů je patrná velmi malá odchylka křivek v průběhu vybíjení v lineární i exponenciální oblasti charakteristiky. Průběh relativní chyby obou krajních křivek vztažených ke středu tolerančního pásma je na obr. 30.



Obr. 29. Křivky závislosti napětí na kapacitě pro proudové hladiny 22, 25 a 28 A





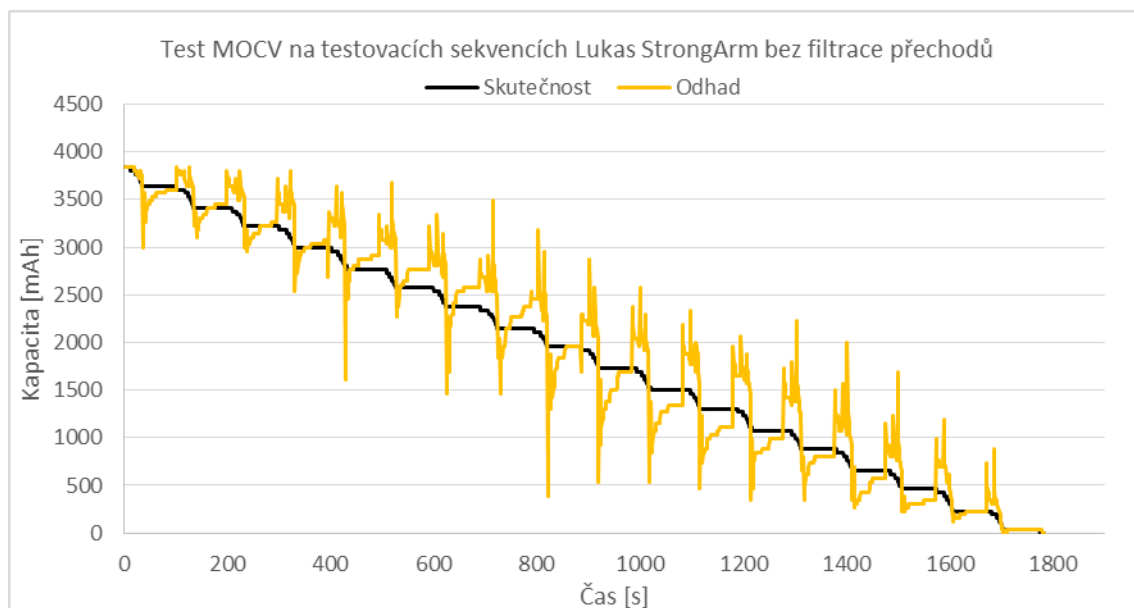
Obr. 30. Průběh relativní chyby v limitních hodnotách tolerančního pásma.

Relativní chyba na obou stranách tolerančního pásma pro proud 25A je téměř pro celý interval SOC menší než  $\pm 3\%$ . Chyba začne narůstat teprve při poklesu SOC pod  $3\%$ . I přes takto malou chybu jsou tyto křivky přidány do metody MOCV. Hladiny z obou krajů tolerančního pásma snižují chybu odhadu při neočekávané proudové hladině. Průměrná relativní chyba obou krajních křivek oproti křivce ve středu tolerančního pásma je menší než  $2\%$ . Celková tabulka proudových hladin, povolených tolerancí a předpokládaných chyb algoritmu odhadu je v tab. 6.

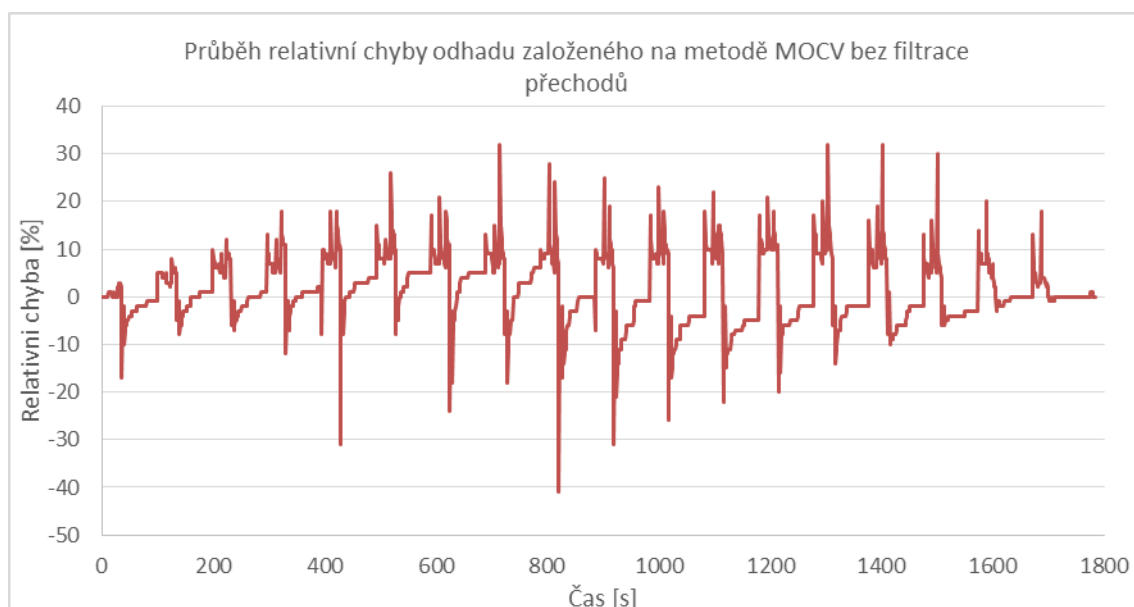
Tab. 6. Pravděpodobné proudové hladiny pro modifikovanou metodu odhadu SOC založenou na metodě OCV

Diskrétní proudová hladina [A]	+8	+4	0	-8	-25	-45
Tolerance proudové hladiny [A]	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$
Maximální předpokládaná relativní chyba odhadu v rámci tolerančního pásma	3%	2%	1%	2%	3%	5%

Po získání všech potřebných křivek byla tato metoda vystavena stejnému testu jako standardní metoda OCV. Akumulátor byl plně nabit a následně zatěžován cykly Lukas StrongArm až do úplného vybití. Výsledný průběh tohoto testu je na obr. 31 a odpovídající průběh relativní chyby na obr. 32.



Obr. 31. Test MOCV bez filtrace přechodů na různé proudové hladiny

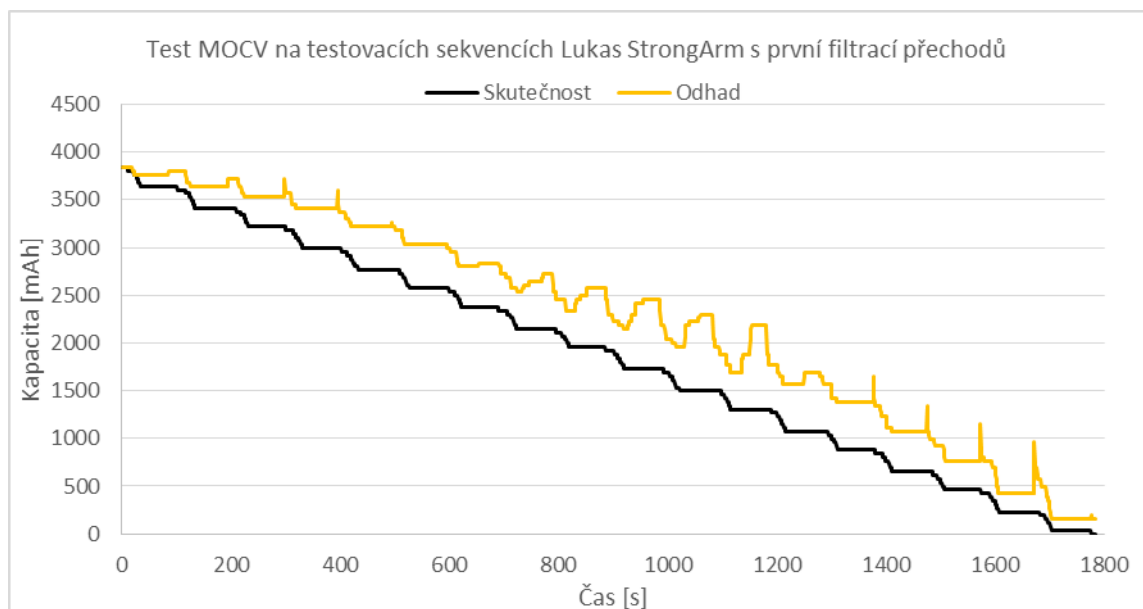


Obr. 32. Průběh relativní chyby MOCV bez filtrace přechodů na různé proudové hladiny

Z průběhu relativní chyby odhadu je patrné výrazné zlepšení metody MOCV oproti metodě OCV. Rozptyl chyby zůstal v obou případech nepříjemný. Zatímco u standardní metody OCV dosahovala chyba hodnot +10 a -75 %, u metody MOCV dosahuje tato chyba +32 a -41 %. Průměrná chyba odhadu ale zaznamenala velké zlepšení. Zatímco u standardní metody OCV dosahovala průměrná chyba přibližně 10 %, u metody MOCV byla průměrná chyba menší než 2 %. Tento fakt ukazuje na možnou filtraci výsledků odhadu. Při bližším zkoumání bylo zjištěno následující chování. Při přechodu na vyšší proudovou hladinu dojde ke krátkodobému zvýšení odhadované kapacity akumulátoru

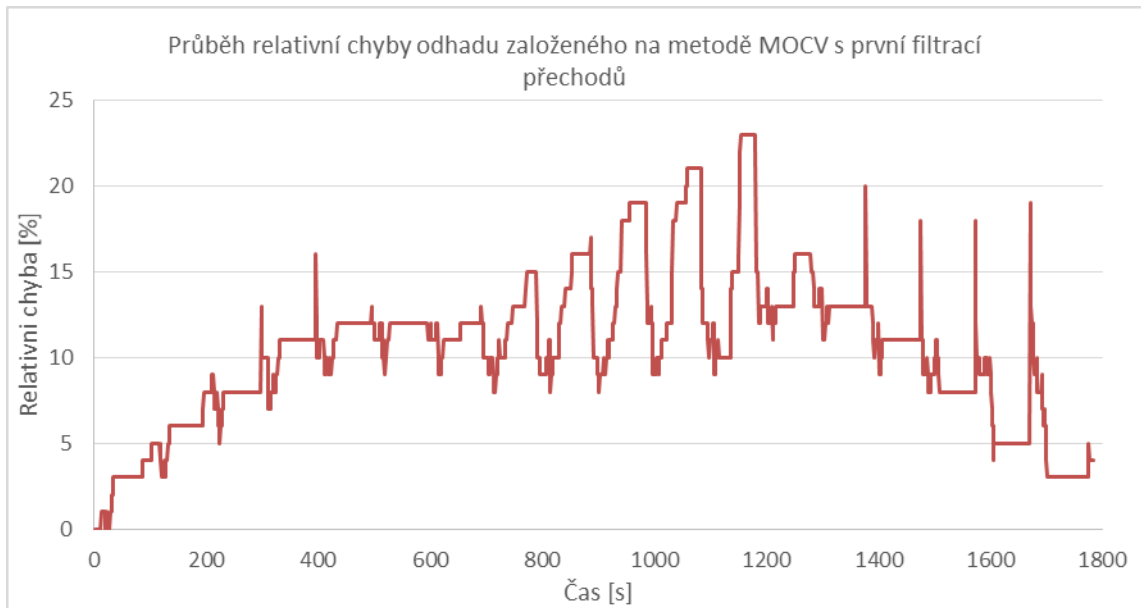
v porovnání se skutečným stavem. Přechodový jev trvá přibližně 3 s. Naopak při návratu na nižší proudovou hladinu dojde k poměrně dlouhodobému poklesu odhadu stavu nabití v porovnání se skutečným stavem nabití. Tento přechodový jev trvá přibližně 15 až 20 s v závislosti na rozdílu proudových hladin. Toto pozorování vedlo k úpravě algoritmu pro odhad pomocí metody MOCV. Úpravu lze matematicky pomocí vztahů (8) a výsledek takto upraveného odhadu je na Obr. 33.

$$\begin{cases} \begin{cases} SOC_N = SOC_{N-1} \\ I_{N-1} = I_N \end{cases} & \begin{cases} SOC_{N-1} < SOC_N \\ SOC_{N-1} \geq SOC_N \end{cases} & I_{N-1} > I_N \\ \begin{cases} SOC_N = SOC_{N-1} \\ I_{N-1} = I_N \end{cases} & \begin{cases} SOC_{N-1} > SOC_N \\ SOC_{N-1} \leq SOC_N \end{cases} & I_{N-1} < I_N \\ \begin{cases} SOC_N = SOC_{N-1} \\ SOC_{N-1} = SOC_N \end{cases} & \begin{cases} SOC_{N-1} < SOC_N \\ SOC_{N-1} \geq SOC_N \end{cases} & I_{N-1} = I_N \end{cases} \quad (8)$$



Obr. 33. Test MOCV s první filtrací přechodů na různé proudové hladiny

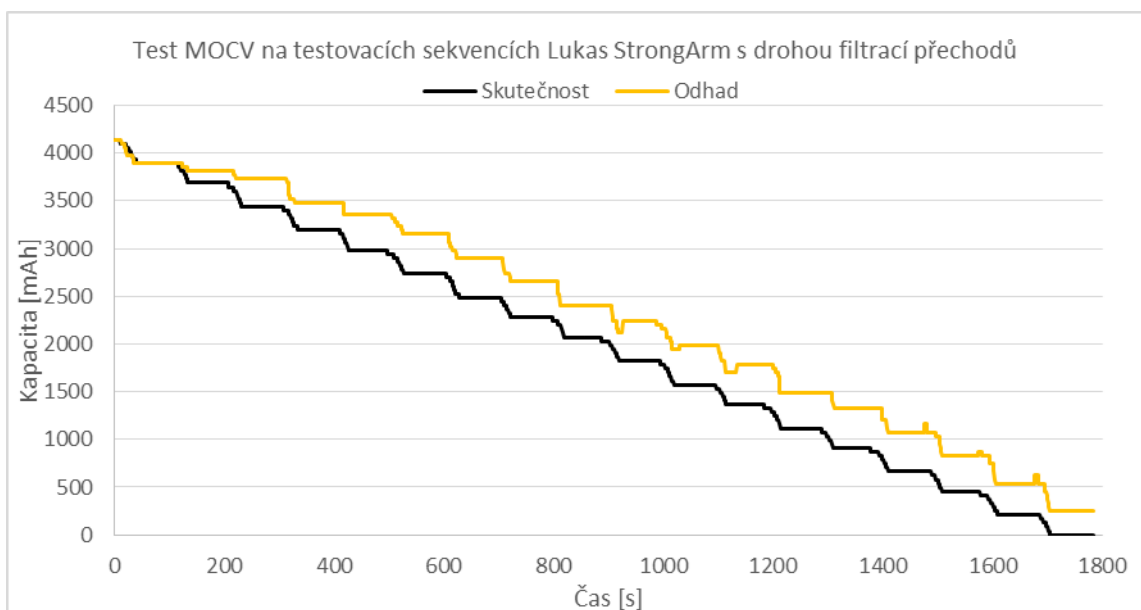
U tohoto odhadu je již vidět velké zlepšení rozptylu odhadu, což je patrné i z grafu relativní chyby odhadu, který se nachází na obr. 34. Z tohoto grafu lze vyčíst, že po první úpravě filtru pro eliminaci přechodové chyby metody MOCV klesla relativní chyba pod 23 %. Průměrná chyba tohoto odhadu se ale zvětšila přibližně na 11 %.



Obr. 34. Průběh relativní chyby MOCV s první filtrací přechodů na různé proudové hladiny

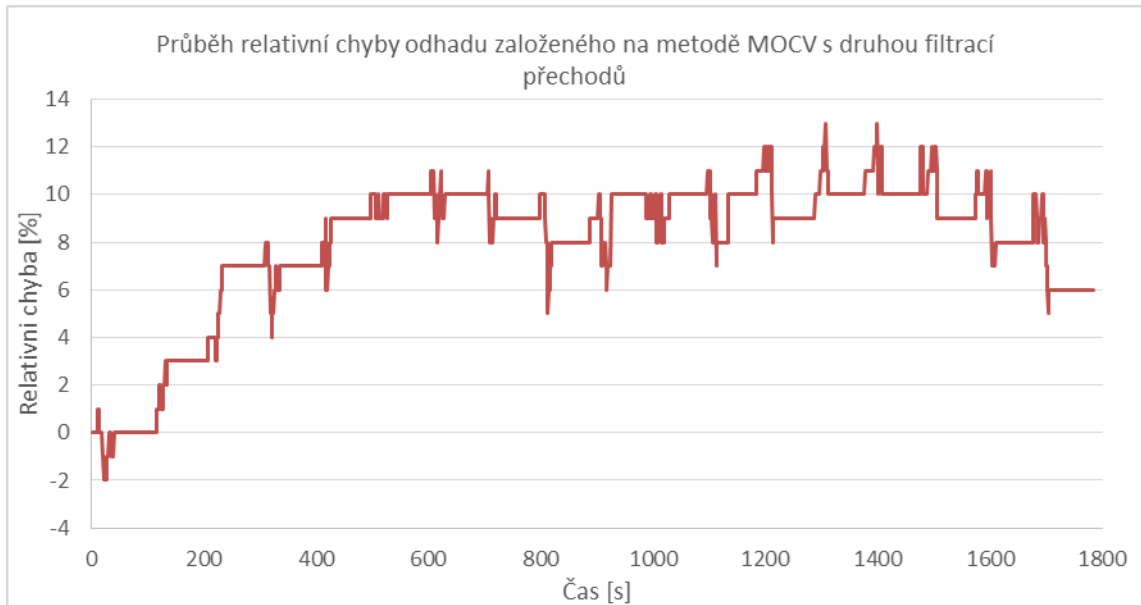
Na základě tohoto pozorování byl vzat do úvahy další fakt o odhadu stavu nabití. Stav nabití se nemůže zvýšit bez průchodu nabíjecího proudu. Byla tedy stanovena maximální možná plusová korekce stavu nabití jako 2 %. Tuto úpravu je možné popsat pomocí vztahů (9) a výsledný odhad je na obr. 35.

$$\begin{cases} \{SOC_N = SOC_{N-1} & (SOC_{N-1} + 2) < SOC_N \\ SOC_{N-1} = SOC_N & (SOC_{N-1} + 2) \geq SOC_N \\ SOC_{N-1} = SOC_N & \end{cases} \quad \begin{matrix} I \leq 0 \\ I > 0 \end{matrix} \quad (9)$$



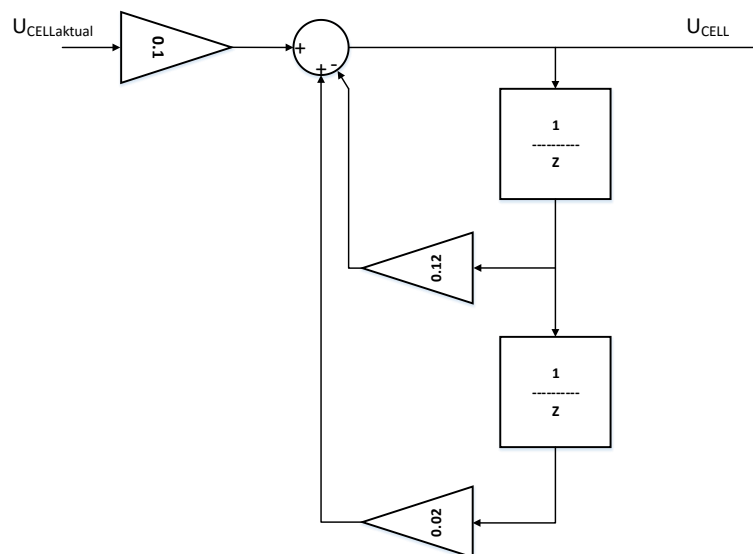
Obr. 35. Test MOCV s druhou filtrací přechodů na různé proudové hladiny

Po této úpravě algoritmu metody pro získání odhadu stavu nabití pomocí metody MOCV se zmenšila jak maximální hodnota relativní chyby odhadu pod 13 %, tak i hodnota průměrné relativní chyby pod 8%. Průběh relativní chyby odhadu je zobrazen na obr. 36.



Obr. 36. Průběh relativní chyby MOCV s druhou filtrací přechodů na různé proudové hladiny

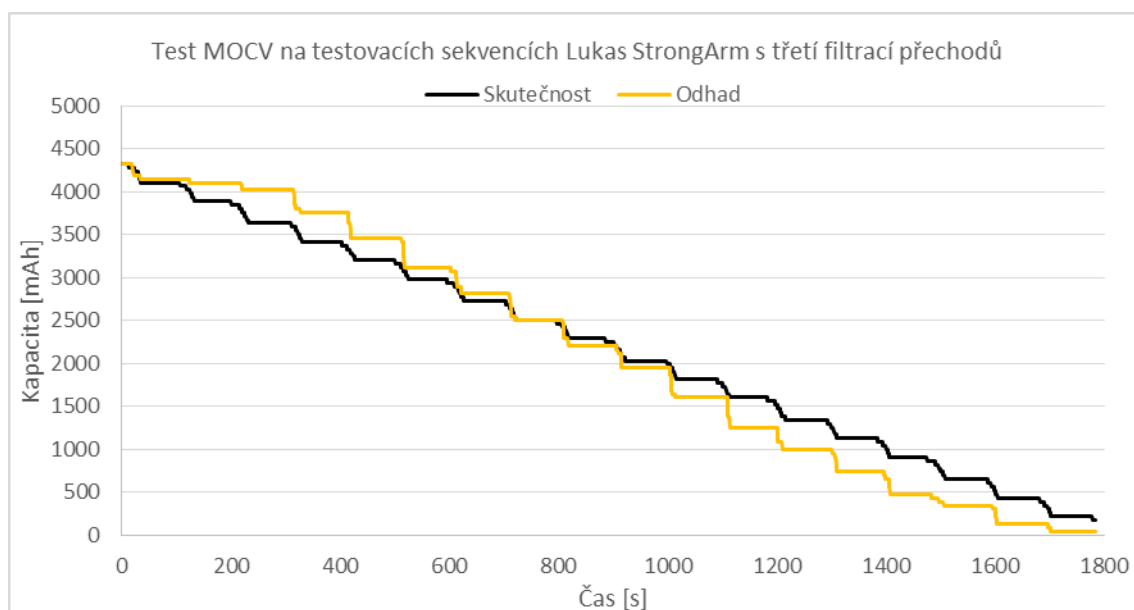
Další krok při návrhu metody MOCV byl zaměřen na potlačení kladného offsetu odhadu. Tento krok spočíval v úpravě křivek závislosti stavu nabití článků na jejich napětí pro všechny proudové hladiny a přidáním filtru pro filtrování napětí vstupujícího do algoritmu odhadu. Výsledný filtr je zobrazen na obr. 37 a popsán v rovnici (10).



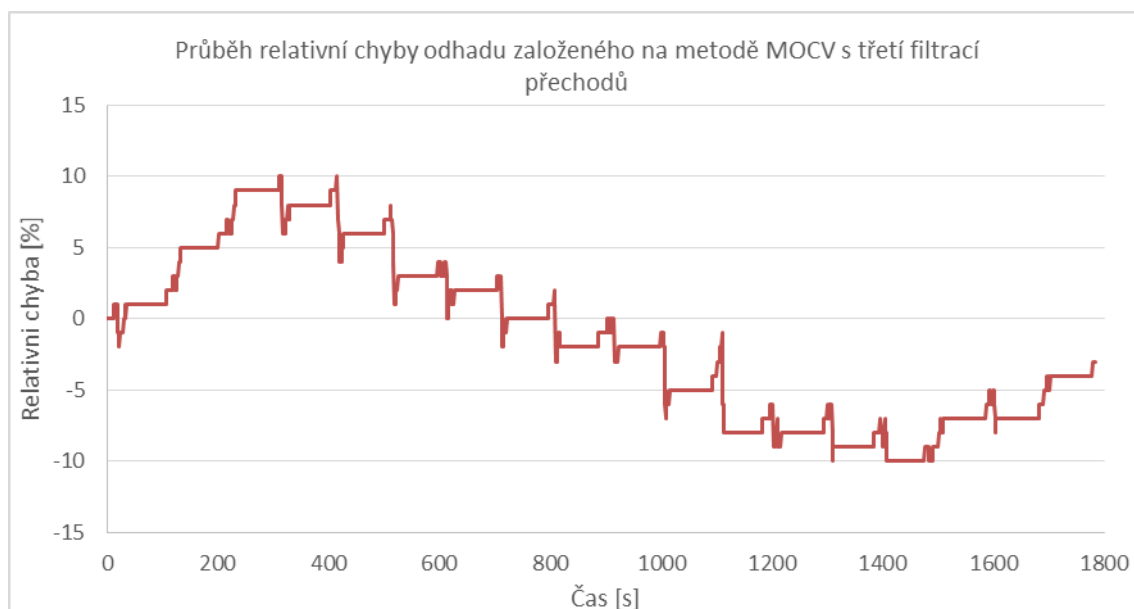
Obr. 37. Filtr napětí vstupujícího do algoritmu MOCV

$$U_{CELL} = U_{CELLaktual} \cdot 0,1 - U_{CELLn-1} \cdot 0,12 + U_{CELLn-2} \cdot 0,02 \quad (10)$$

Při podrobnější prozkoumání filtru lze identifikovat filtr jako modifikovaný aperiodický člen sloužící k potlačení rušení hodnot z AD převodníku a analogového multiplexeru určeného pro měření napětí článků. Výsledný odhad stavu nabití je na obr. 38 a odpovídající relativní chyba tohoto odhadu je na obr. 39.



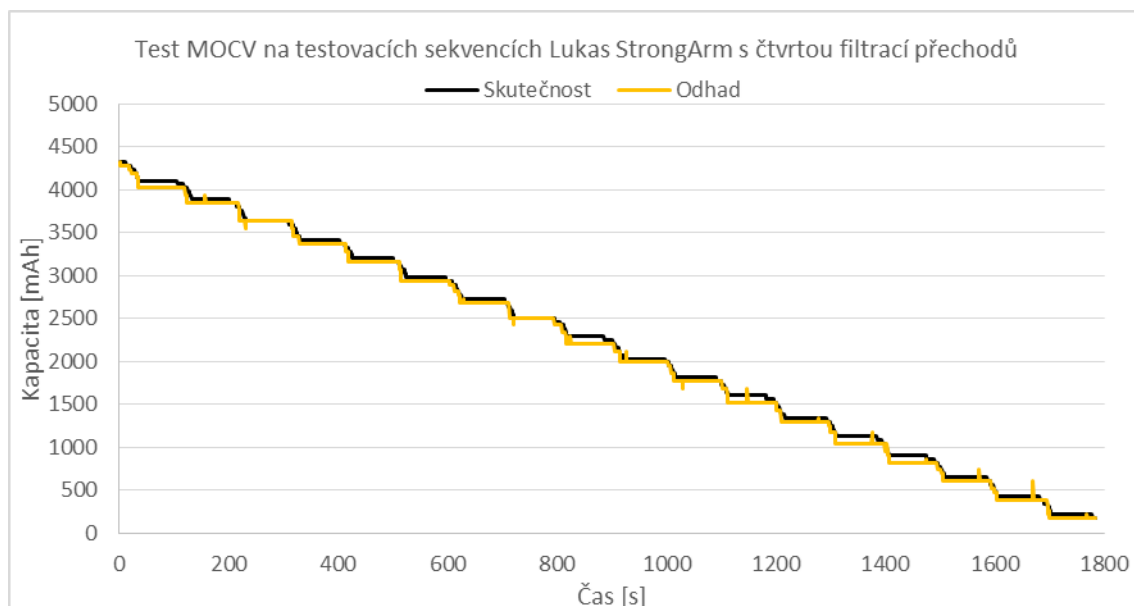
Obr. 38. Test MOCV s třetí filtrací přechodů na různé proudové hladiny



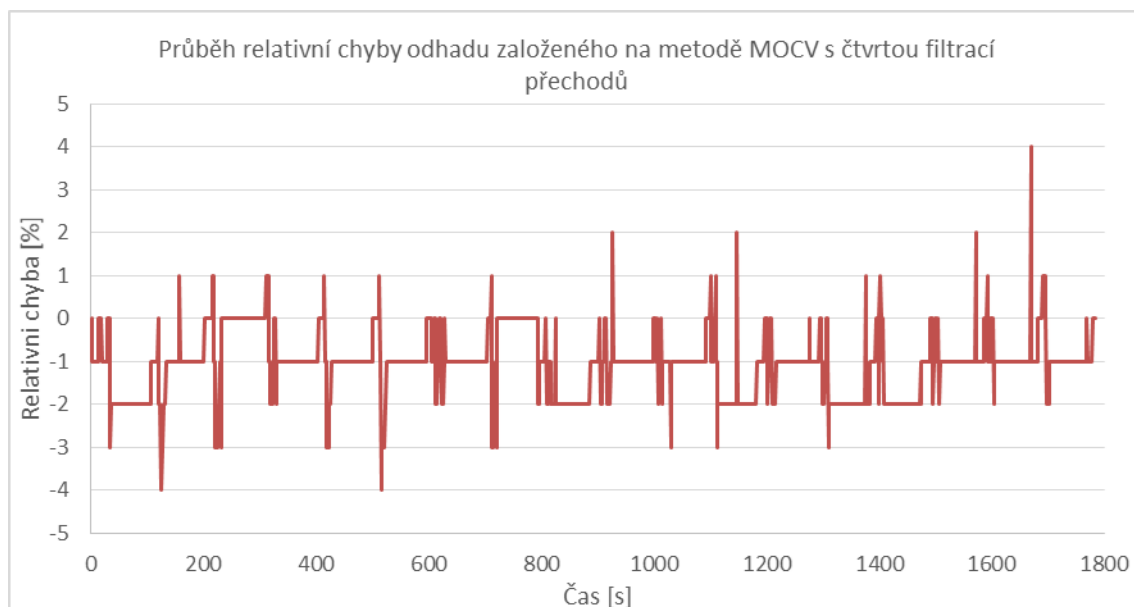
Obr. 39. Průběh relativní chyby MOCV s třetí filtrací přechodů na různé proudové hladiny

Z průběhu odhadu stavu nabití je patrné velmi malé zlepšení odhadu. Průměrná relativní chyba odhadu sice klesla pod 2 %, na druhou stranu rozptýl maximální chyby

stoupl na  $\pm 10\%$ . Pro další úpravu metody odhadu stavu nabití založeného na metodě MOCV bylo nutné naměřit velké množství dat a tato data následně statisticky zpracovat. Na základě těchto statistik byla vytvořena čtvrtá a současně poslední korekce metody MOCV. Výsledek čtvrté korekce odhadu je na obr. 40. Tento odhad již téměř dokonale kopíruje průběh skutečného stavu nabití akumulátoru v laboratorních podmínkách.



Obr. 40. Test MOCV s čtvrtou filtrací přechodů na různé proudové hladiny



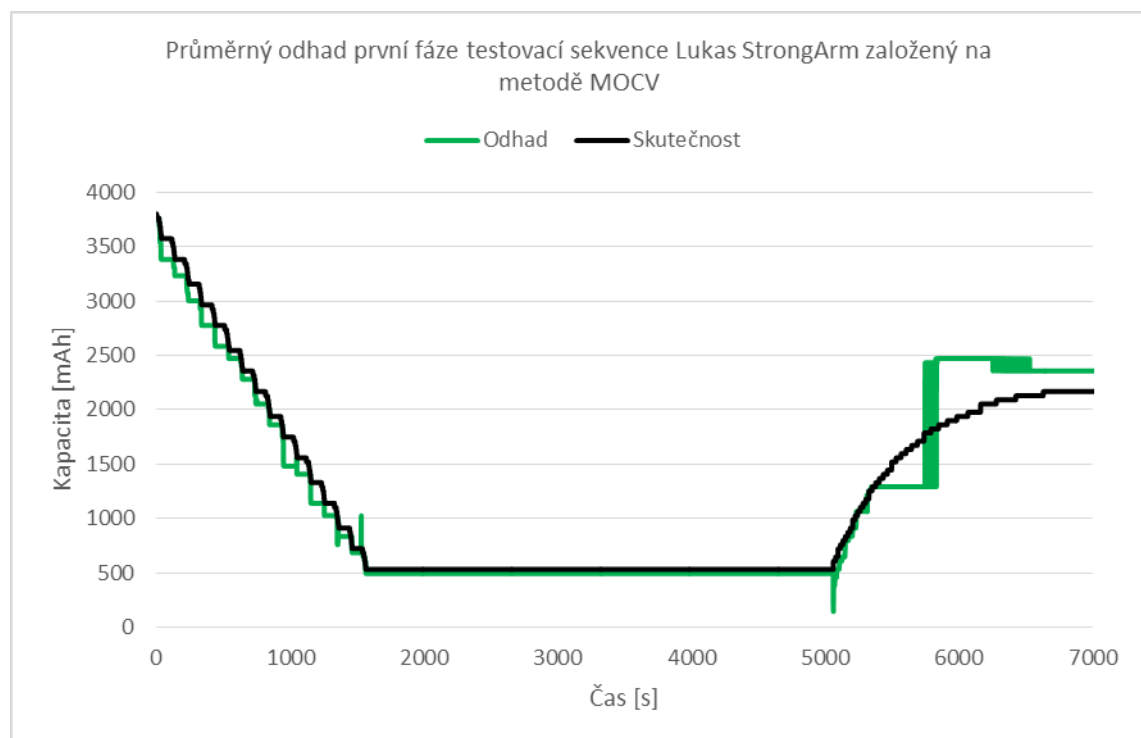
Obr. 41. Průběh relativní chyby MOCV s čtvrtou filtrací přechodů na různé proudové hladiny

Průběh relativní chyby odhadu stavu nabití založeného na poslední fázi algoritmu vykazuje již velmi uspokojivé vlastnosti. Maximální chyba odhadu dosahuje hodnot -

4 až +4 % a to pouze v přechodovém stavu. V ustáleném stavu se maximální hodnota chyby odhadu pohybuje mezi 0 a -2 % Průměrná chyba odhadu je -1 %.

#### 8.1.4.1 Aplikace nově navržené metody odhadu z napětí zatíženého článku na testovací sekvenci Lukas StrongArm

Odpovídající průměrný výsledek odhadu dosažený metodou MOCV porovnaný s matematickým výsledkem je na obr.42. Průměrného výsledku je dosaženo zpřůměrováním všech měření. Do tohoto měření jsou započtena měření při různých teplotách i měření na různých akumulátorech.

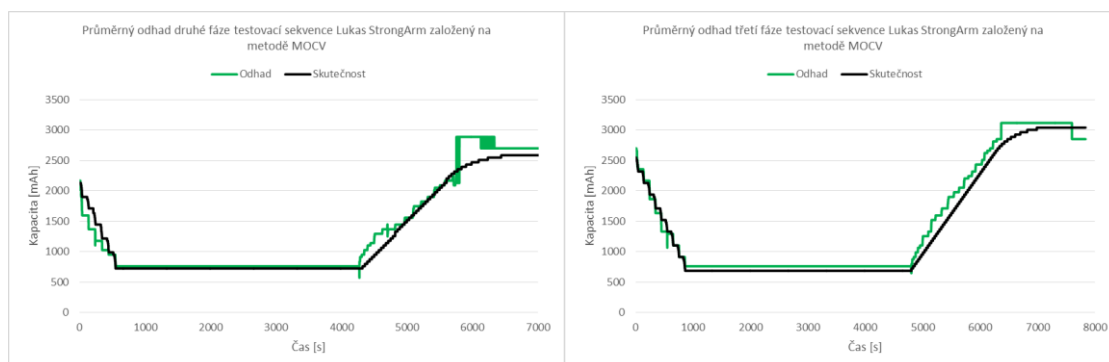


Obr. 42. Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem v první fázi testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3

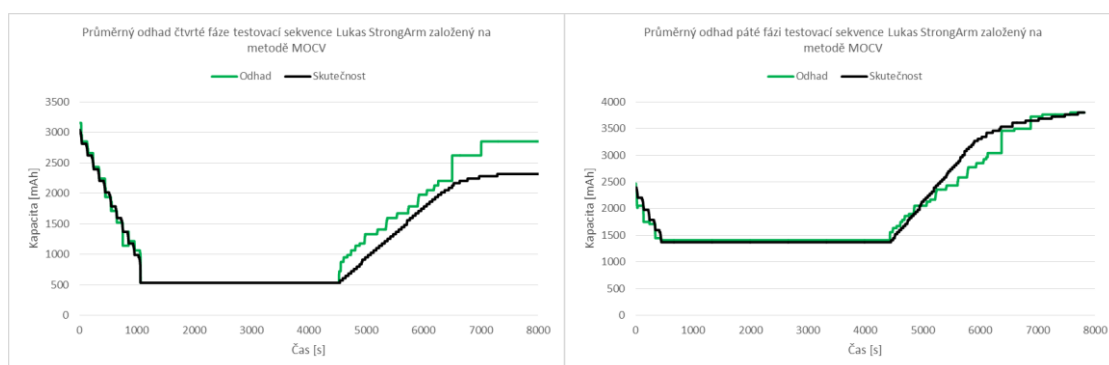
Výsledek odhadu při vybíjení v průběhu první fáze testovací sekvence vypadá velice slibně. Maximální hodnota relativní chyby tohoto odhadu dosáhla 7%, přičemž tato chyba byla dosažena pouze v přechodovém stavu zátěže po dobu 2 sekund. Průměrná hodnota relativní chyby v průběhu vybíjení dosáhla hodnoty -3%. Tyto výsledky splňují počáteční požadavky na přesnost navržené metody odhadu stavu nabití akumulátoru. Oproti tomu průběh odhadu při nabíjení akumulátoru vykazuje již na první pohled poměrně velkou chybu. Tato chyba dosáhla hodnot  $\pm 15\%$ , což je způsobeno malým počtem diskretních proudových hladin pro nabíjecí proudy a lze jí zmenšit přidáním dalších diskretních křivek do algoritmu odhadu. Na druhou stranu není chyba odhadu



v průběhu nabíjení příliš kritická, neboť k jejímu zmenšení dochází do několika desítek sekund po odpojení akumulátoru od nabíječky, kdy se začíná projevovat chování standardní metody OCV. Na obrázcích obr. 43 a obr. 44 jsou znázorněny průběhy ve zbylých fázích testu.



Obr. 43. Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem druhé a třetí fáze testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3



Obr. 44. Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem čtvrté a páté fáze testovací sekvence dle kapitoly 7.2.1.3

I při druhé fázi testovací sekvence je již na první pohled patrná relativně malá chyba odhadu při vybíjení akumulátoru a poměrně velká chyba při jeho nabíjení. Relativní chyba v průběhu vybíjení dosáhla v přechodovém stavu hodnoty -11 % a v ustáleném stavu byla naměřena maximální hodnota relativní chyby odhadu -8 %. Průměrná relativní chyba odhadu v průběhu vybíjení odpovídá hodnotě -5 %. Z uvedeného chování plyne nesplnění stanovených podmínek metody odhadu stavu nabití akumulátoru o 3%. Zvýšená chyba odhadu je způsobena změnou počátečních podmínek akumulátoru a tedy i změnou počátečního stavu proměnných v algoritmu odhadu stavu nabití. Jiný průběh chyby v průběhu nabíjení je způsoben jinou hodnotou nabíjecího proudu. Relativní chyba odhadu třetí fáze testovací sekvence prokazuje velké zlepšení. Toto zlepšení je ale opět způsobeno pouze změnou počátečních podmínek, nikoli zlepšením algoritmu odhadu. Maximální chyba odhadu v přechodovém stavu dosáhla hodnoty -7 %, zatímco chyba

v ustáleném stavu dosáhla maximálně hodnoty -5 %. Průměrná relativní chyba v průběhu vybíjení pak dosáhla hodnoty -2 %. Z tohoto testu tedy vyplývá, že navržená metoda v této fázi splnila požadovaný cíl přesnosti  $\pm 5$  %. Relativní chyba odhadu ve čtvrté fázi testovací sekvence dosáhla v přechodovém stavu hodnot -7 a + 12 %. V ustáleném stavu byla maximální naměřena relativní chyba odhadu -6 % a průměrná chyba odhadu dosáhla hodnoty +1 %. Jelikož však metoda v této fázi odhadu přesáhla stanovený cíl relativní chyby v ustáleném stavu s rozptylem do 5 % o 1 %, nesplnila požadavek na navrženou metodu. Maximální relativní chyba v přechodovém stavu v páté fázi testovací sekvence dosáhla hodnoty -7 %. V ustáleném stavu se maximální hodnota relativní chyby opět zastavila na hodnotě -6 % a průměrná chyba dosáhla hodnoty -4 %. Ani v této fázi testovací sekvence tak nebyl splněn počáteční požadavek na přesnost odhadu a to 1 %.

Maximální chyba této metody v průběhu celé testovací sekvence dosáhla v přechodovém stavu hodnoty 12 %, což je ve srovnání s nemodifikovanou metodou OCV zatíženou pracovními cykly (75 %) opravdu dobrý výsledek. Přechodová chyba ovšem nemá vliv na výsledné hodnocení navržené metody, neboť vzniká v době, kdy uživatel nemůže stavu nabití věnovat pozornost a musí se soustředit na svou záchrannářskou činnost. I tak ovšem nebyl v průběhu celého testu splněn počáteční požadavek na přesnost vytvořeného odhadu v ustáleném stavu a to ve třech z pěti fází testovací sekvence. Největší odchylka od stanoveného cíle byla zaznamenána v průběhu druhé fáze testovací sekvence a to 8 %, což je o 3 % více, než byl stanoven cíl odhadu. Průměrná relativní chyba v průběhu vybíjení ve všech fázích dosáhla hodnoty -3 % a jedná se tak o velmi slibný výsledek.

Zatímco v případě metody CCM měl průběh relativní chyby integrální charakter, což vyplývá ze způsobu odhadu, u metody MOCV vypadá průběh relativní chyby spíše jako chyba derivační způsobená rychlou změnou průběhu proudu. Relativní chyby odhadů při všech nabíjecích fázích pracovních cyklů akumulátorů vykazují opravdu velkou odchylku od matematického předpokladu. V průběhu nabíjení je přijatelnější záporná chyba. To znamená, že akumulátor ukazuje na nabíječe nižší stav nabití, než je skutečnost.

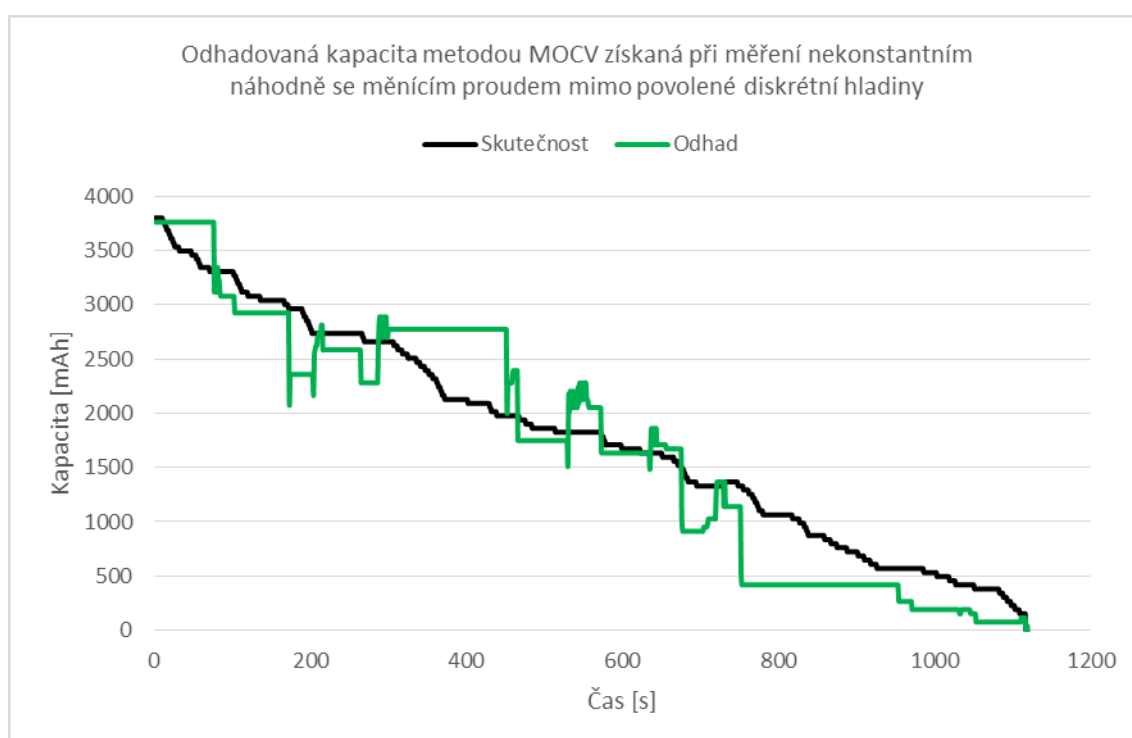
Reálná měření prokázala závislost odhadu metodou MOCV na teplotě akumulátorů. S rostoucí teplotou akumulátoru a tedy i komponent na PCB roste nejen vnitřní odpor článků, ale zároveň i chyba samotného měření parametrů článků a zátěže. Zatímco změna

vnitřního odporu článků se dá poměrně lehce změřit a kompenzovat, změny parametrů komponent obsažených na plošném spoji stejně jako jejich teploty se měří a kompenzují jen velmi obtížně. Testy dále prokázali, že tato metoda také zdárně zohledňuje stárnutí a poškození článků. Na druhou stranu byla prokázána závislost této metody na počátečním stavu nabití.

#### 8.1.4.2 Test odhadu při proudech mimo stanovené diskrétní proudové hladiny

Při testování této metody vyvstala otázka: co se stane, když zanecháme diskrétní proudové hladiny a jejich toleranční pásma nastavené pro tuto konkrétní aplikaci a změníme proudový profil zátěže. Pro nalezení odpovědi na tuto otázku byl vytvořen následující test. Výsledný průběh odhadu metodou MOCV je zobrazen na obr. 45.

- Bylo zvoleno 8 diskrétních hladin proudu (0, 1, 3, 5, 10, 20, 30 a 60 A).
- Čas pro přechod na další náhodnou hladinu byl nastaven v náhodném časovém intervalu z rozpětí 500 ms až 30 s.
- Průběh proudu je stejný jako pro test metody CCM a je vyobrazen na obr. 21.



Obr. 45. Odhadovaná kapacita metodou MOCV při náhodném proudu mimo definované diskrétní hladiny a jejich toleranční pásma

Z průběhu odhadu plyne poměrně velké zhoršení této metody při proudech mimo definované diskrétní hladiny a jejich toleranční pásma, přičemž největší relativní chyby

dosahuje tato metoda při překročení maximální proudové hladiny. Je proto nezbytné přidat do metody alespoň jednu hladinu nad maximální předpokládaný proud. Takto zvolená hladina musí ale vždy respektovat maximální přípustný proud zvolených článků, při jejichž překročení dochází k rychlé degradaci životnosti článků.

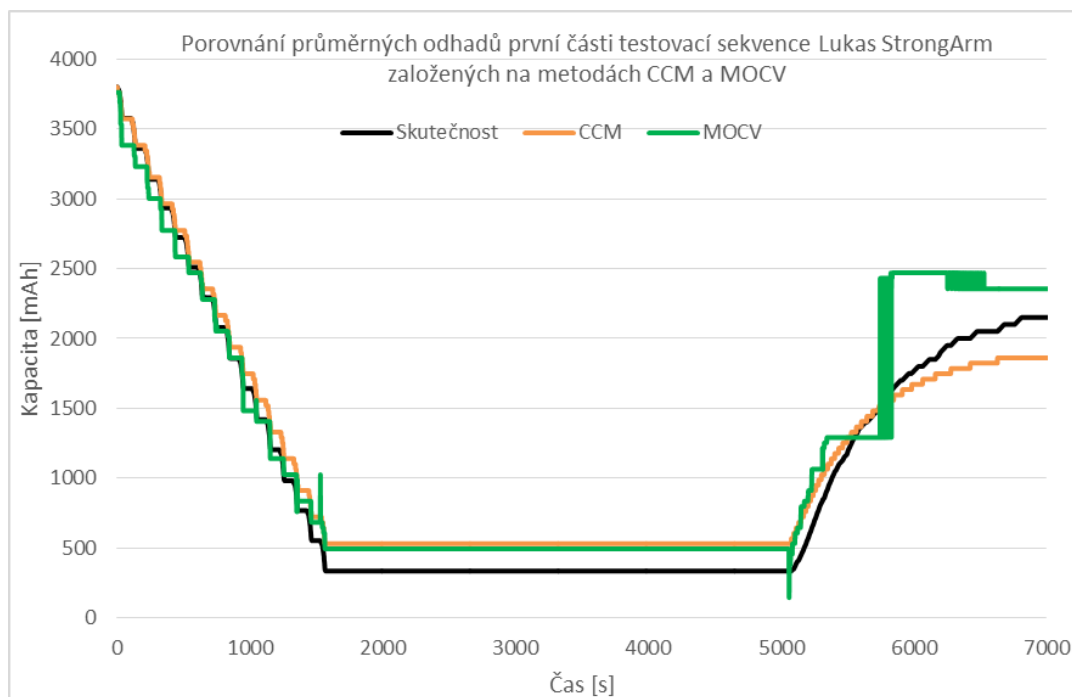
V tomto testu dosahovala největší hodnota relativní chyby v ustáleném stavu hodnot +22 a -21 %. Průměrná hodnota relativní chyby v průběhu testu náhodným proudem dosáhla hodnoty -2 %. Výsledek tohoto testu tedy ukázal velkou nestabilitu navržené metody odhadu při opuštění stanovených zatěžovacích proudových hladin. Nejlepším způsobem, jak nedostatek metody eliminovat je přidání výpočtu vlastních vybíjecích křivek akumulátoru závislých na standardní metodě OCV. Do tohoto výpočtu vstupuje proud odebíraný z akumulátoru (nabíjený do akumulátoru) a vnitřní odpor akumulátoru v daném stavu nabití akumulátoru (viz vzorec 5). Ani toto vylepšení ovšem nemá za následek vznik dokonalé metody. Při extrémních proudech odebíraných z akumulátoru (přesahujících maximální povolenou mez) začíná ve vnitřním odporu akumulátoru převládat samotná rezistivita elektrod akumulátoru způsobená nadměrným ohříváním vnitřního uspořádání akumulátoru, spojená s nezanedbatelným přechodovým odporem spojovačů článků nad odporem elektrochemickým.

#### **8.1.5 Kombinace metod odhadu stavu nabití z napětí článku a integrace proudu**

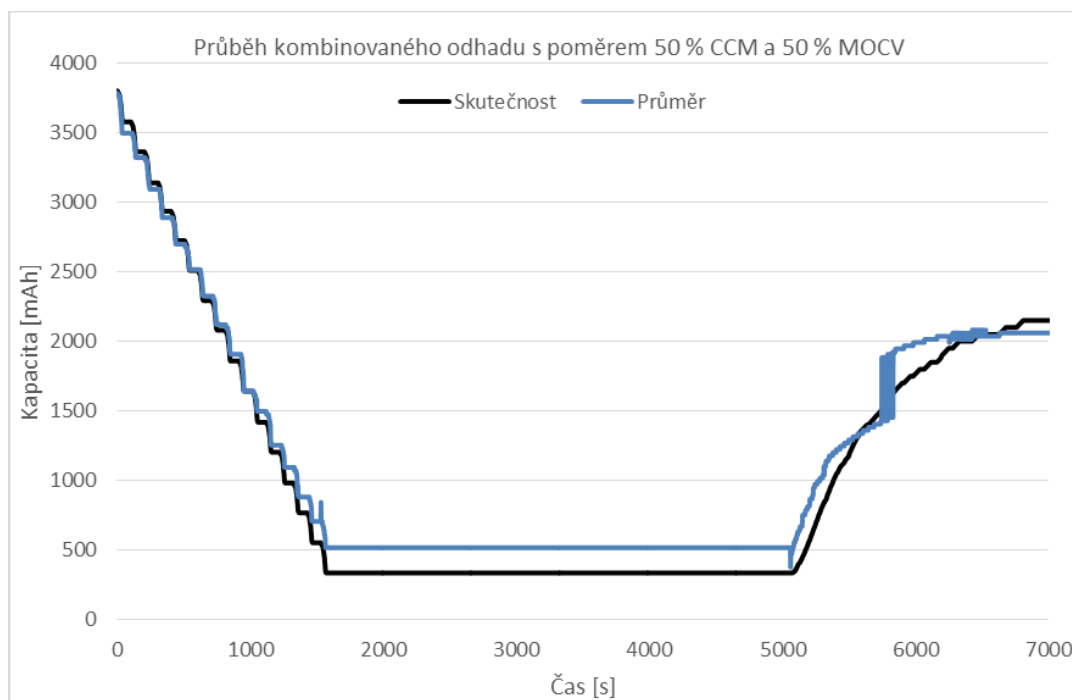
Dle předchozích výsledků testovaných metod je jasné, že nejlepšího výsledku je možné dosáhnout kombinací metod standardní OCV, modifikované OCV a metody CCM. Standardní metoda OCV je použitelná, jak bylo prokázáno v kapitole 8.1.1, pro zjištění počátečního stavu nabití akumulátoru v okamžiku probuzení akumulátoru z režimu spánku, před přechodem akumulátoru do režimu spánku a v případě, kdy z (do) akumulátoru neteče proud po dobu alespoň 5 minut, to znamená ve statickém stavu akumulátoru.

Modifikovaná metoda OCV je u levných systémů sama o sobě relativně přesným zdrojem odhadu stavu nabití. Její slabina ale spočívá v poměrně přesném definování diskretních proudových hladin. Tato vlastnost může být nebezpečná v případě použití akumulátoru v kombinaci s jiným zařízením. Proudová hladina se může také změnit vlivem stárnutí napájeného zařízení či samotného akumulátoru. Tato metoda ale může, při vhodně nastavené váze, sloužit pro korekce metody CCM, čímž se potlačí integrální šum metody CCM a přechodový (derivační) šum modifikované metody OCV.

Pro začátek bude nastavena váha mezi odhady CCM a MOCV na 50:50 %. To znamená, že se v každém kroku odhadu vezme odhad metodou MOCV a metodou CCM a z obou odhadů se udělá aritmetický průměr. Tento průměr je pak výsledným odhadem. Pro názornější ukázkou těchto odhadů jsou oba odhady v původním tvaru vyneseny do jednoho grafu na obr. 46 a výsledný aritmetický průměr na obr. 47.

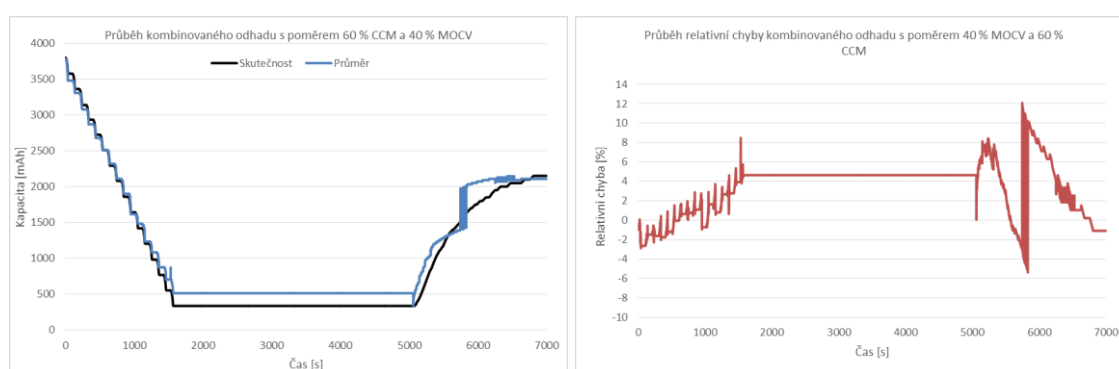


Obr. 46. Porovnání odhadu pomocí metody CCM a modifikované metody OCV



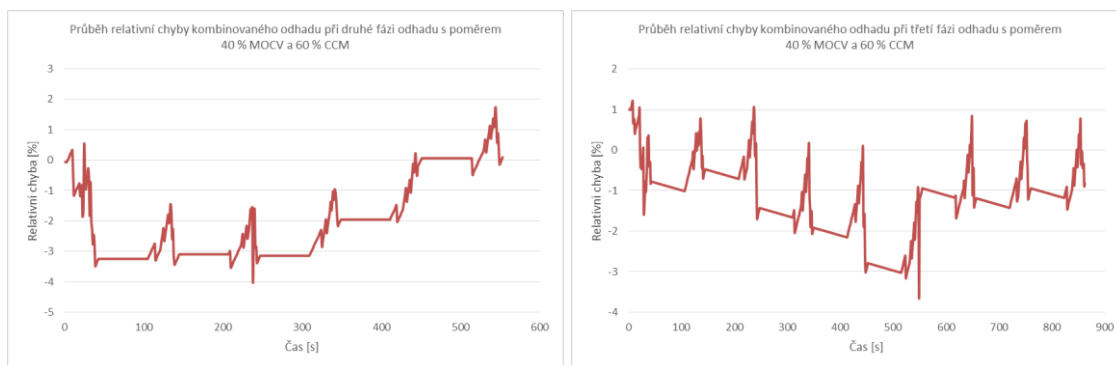
Obr. 47. Průběh výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 50:50

Průběh relativní chyby kombinace obou metod při poměru 50:50 vykazuje velké zlepšení oproti samotné metodě MOCV. Ve stejné fázi, kde maximální chyba v přechodových stavech dosahovala rozptylu  $\pm 10\%$ , dosahovala maximální hodnota relativní chyby v případě kombinovaného odhadu hodnot  $-3$  a  $+9\%$ . V ustáleném stavu se pak hodnota relativní chyby pohybovala v rozmezí  $-3$  až  $+5\%$ . Tento výsledek sice splňuje počáteční požadavky na přesnost odhadu stavu nabití, ale z poměru potlačení chyb obou metod lze usuzovat na možné zlepšení přesnosti odhadu při změně poměru ku prospěchu metody CCM. Výsledný průběh odhadu při poměru 40:60 je zobrazen na obr. 48.

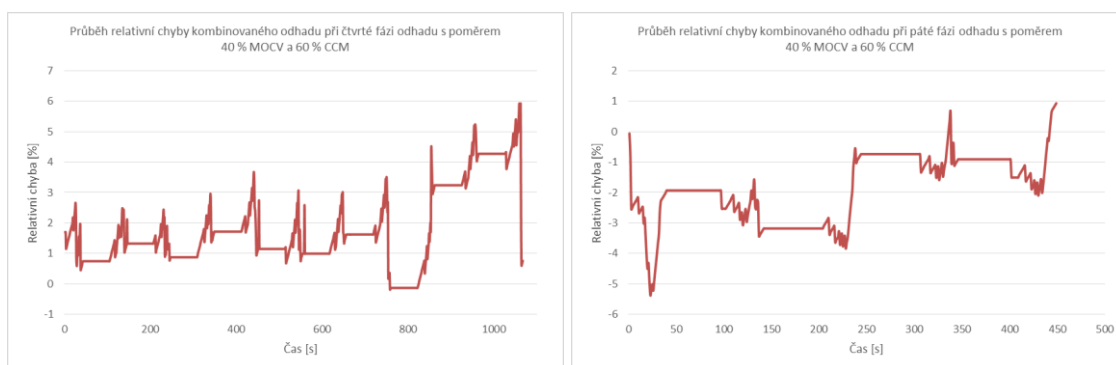


Obr. 48. Průběh výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 a průběh jeho relativní chyby.

Při pohledu na výsledný odhad lze konstatovat, že se začíná projevovat integrační chyba pocházející z metody CCM, ale dochází opět ke zmenšení přechodové chyby z metody MOCV. Z průběhu relativní chyby kombinace obou metod je patrné, že maximální relativní chyba odhadu zůstala stejná jako v případě samotné metody CCM (tj.  $5\%$ ). Proč tedy použít tento komplikovaný odhad? Odpověď lze získat při pohledu na chyby ostatních částí testovací sekvence. Chyby těchto odhadů budou z důvodu větší přehlednosti a nezajímavosti chyby v průběhu nabíjení zobrazeny pouze pro vybíjecí část testovacích sekvencí. Relativní chyba pro vybíjení při druhé až páté fázi testovací sekvence jsou zobrazena na obr. 49 a obr. 50.



Obr. 49. Průběh relativní chyby výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 pro druhou a třetí fázi testovací sekvence



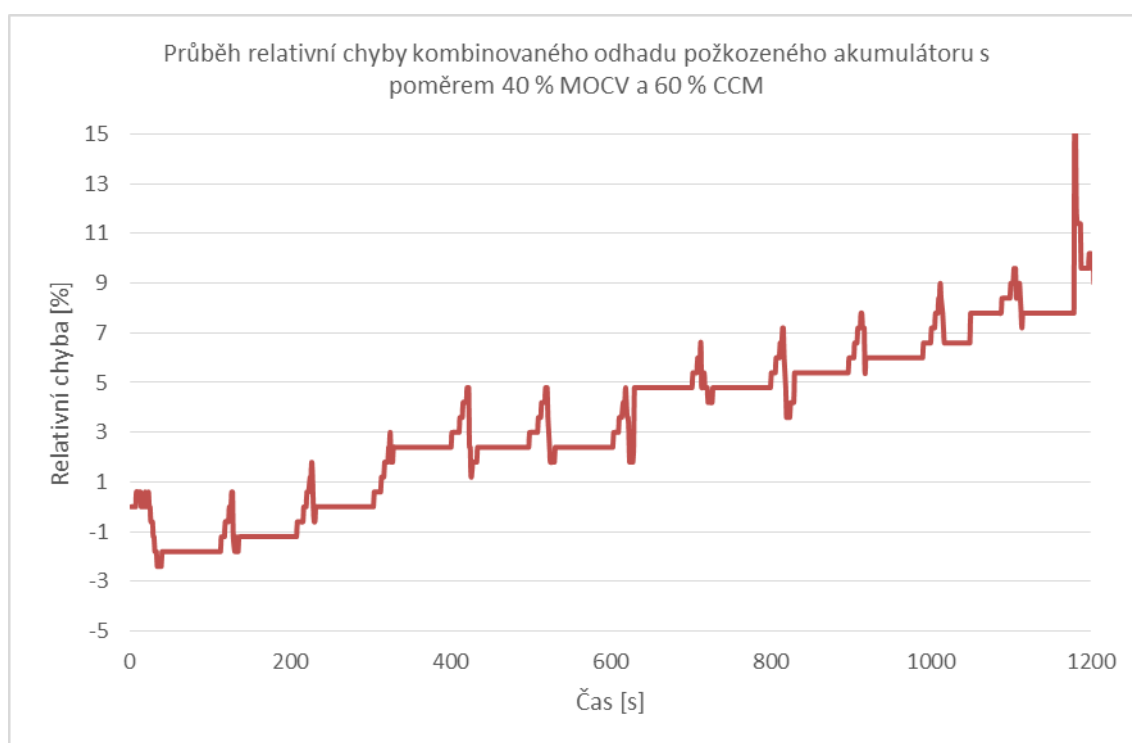
Obr. 50. Průběh relativní chyby výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 pro čtvrtou a pátou fázi testovací sekvence

Relativní chyba odhadu ve všech částech testovací sekvence je nižší než chyba v obou samostatných metodách. Maximální hodnota relativní chyby zkombinovaných metod dosáhla v přechodovém stavu hodnoty 7 %. Tato chyba sice přesahuje povolenou mez 5 %, ale na rozdíl od obou metod byla dosažena pouze v přechodovém stavu akumulátoru, tj. v době, kdy z akumulátoru tekl proud do zátěže. V této fázi není přesnost odhadu kritická, neboť uživatel při výkonu záchranné činnosti nemá čas sledovat stav nabití akumulátoru. Uživatel může sledovat stav nabití pouze v čase klidu, tedy když je motor hydraulických nůžek vypnutý. V tuto dobu byla maximální naměřená relativní chyba odhadu do 3%, což je chyba splňující počáteční kritéria odhadu. Průměrná chyba kombinace obou odhadů dosáhla velmi uspokojivé hodnoty 2,15%.

#### 8.1.5.1 Test výsledné navržené metody odhadu stavu nabití na dvojici poškozených akumulátorů

Výsledky testů provedených na nových a nepoškozených akumulátorech vykazují vysokou úspěšnost. Nastává proto otázka, jak bude vypadat test na akumulátoru poškozeném stářím, nešetrným zacházením, případně jiným způsobem. Pro tyto testy byly záměrně vybrány akumulátory poškozené přibližně dvěma sty cykly za teplot

přesahujících povolené limity pro nabíjení i vybití. Kapacita těchto akumulátorů byla vlivem testů snížena přibližně na 72% a tyto akumulátory je tedy možné označit za vadné a vhodné pouze pro recyklaci. Oba tyto akumulátory byly vystaveny testům odhadu stavu nabití z plného nabití akumulátoru do jejich úplného vybití. V obou případech byl odhad nastaven na kombinovaný MOCV a CCM s poměrem 40:60. U takto výrazně poškozených akumulátorů nevhodným zacházením byly změněny snad všechny parametry. Parametr, kterého si všimne každý uživatel, je již zmíněná snížená kapacita. To však není ani z daleka jediný zhoršený parametr článků. Poškození se mimo jiné týká i změny křivka OCV a nárůstu vnitřního odporu. Dá se tedy očekávat velmi špatný výsledek odhadu stavu nabití takového akumulátoru za použití jakékoli zmíněné metody. Nejmenší vliv pozměněných parametrů článků se dá očekávat u dobře nastavené metody CCM. Pojďme se tedy podívat, jak si s takto poškozeným akumulátorem poradí navržený odhad. Nejhorší naměřená chyba výsledného odhadu je zobrazena v grafu na obr. 51.



Obr. 51. Průběh relativní chyby výsledného odhadu kombinace metody MOCV a CCM při poměru 40:60 pro vadný akumulátor se sníženou kapacitou

V případě poškozeného akumulátoru se nejvíce projevila integrační chyba metody CCM, která je způsobena poklesem kapacitou akumulátoru. Tato chyba do odhadu zanesla chyby +5 %. Rušení způsobené metodou MOCV způsobilo v ustáleném stavu chybu +4 %. V přechodovém stavu bylo naměřeno maximum relativní chyby na hodnotě 10 %, což v kombinaci metod CCM a MOCV vytvořilo chybu 15% na dobu 2 sekund.



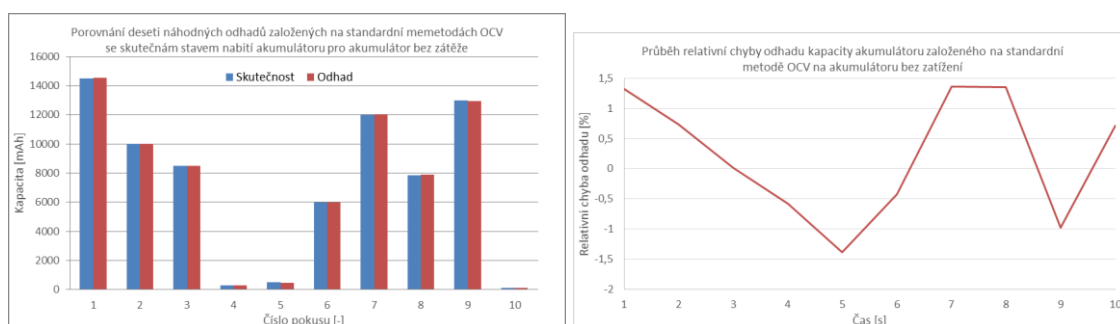
Maximální hodnota relativní chyby kombinovaného odhadu v ustáleném stavu byla 9%, což je přibližně dvojnásobek povolené chyby.

Z testu na poškozeném akumulátoru vyplývá, že přítomnost metody CCM ve výsledné metodě kazí úspěšnost odhadu. Na druhou stranu by integrační chyba metody CCM v reálním provozu na poškozeném akumulátoru dosahovala mnohem menší hodnoty, neboť by byla hodnota maximální kapacity akumulátoru v průběhu celého testování akumulátoru snižována s jejím poklesem měřeným v závislosti na nabitě a vybité kapacitě. Do testu metody odhadu stavu nabití na poškozeném akumulátoru byla vnesena chyba způsobená přeprogramováním ochranné elektroniky FW s výsledným algoritmem a nastavenou kapacitou akumulátoru nového akumulátoru. Reálný test s adaptovanou hodnotou kapacity akumulátoru a tedy test začínající na novém akumulátoru a končící na akumulátoru poškozeném nešetrným zacházením by vyžadoval několik měsíců testování bez změn ve FW elektronice. Kapacita nového akumulátoru byla zvolena z důvodu velké počáteční odchylky a možnosti poškození integrity dat uložených v paměti mikroprocesoru. V takovém případě se do algoritmu odhadu nastaví počáteční parametry akumulátoru a adaptování všech metod probíhá od začátku.

## 8.2 Zhodnocení výsledků akumulátorů do elektro-kolo ElectroLyte Vohrradler

### 8.2.1 Metoda odhadu stavu nabití založeného na měření napětí nezatíženého článku

Standardní metoda OCV je na rozdíl od akumulátoru do záchranného zařízení Lukas použitelná nejen pro odhad počátečního stavu nabití akumulátoru, ale zároveň lze využít ve všech případech dočasného odstavení elektrokola, případně dlouhého sjezdu z kopce bez využití rekuperace. Odhad deseti náhodně vybraných detekcí počátečního stavu nabití akumulátoru pomocí standardní metody OCV je zobrazeno na grafu na obr. 52 vlevo a odpovídající průběh relativní chyby vpravo.



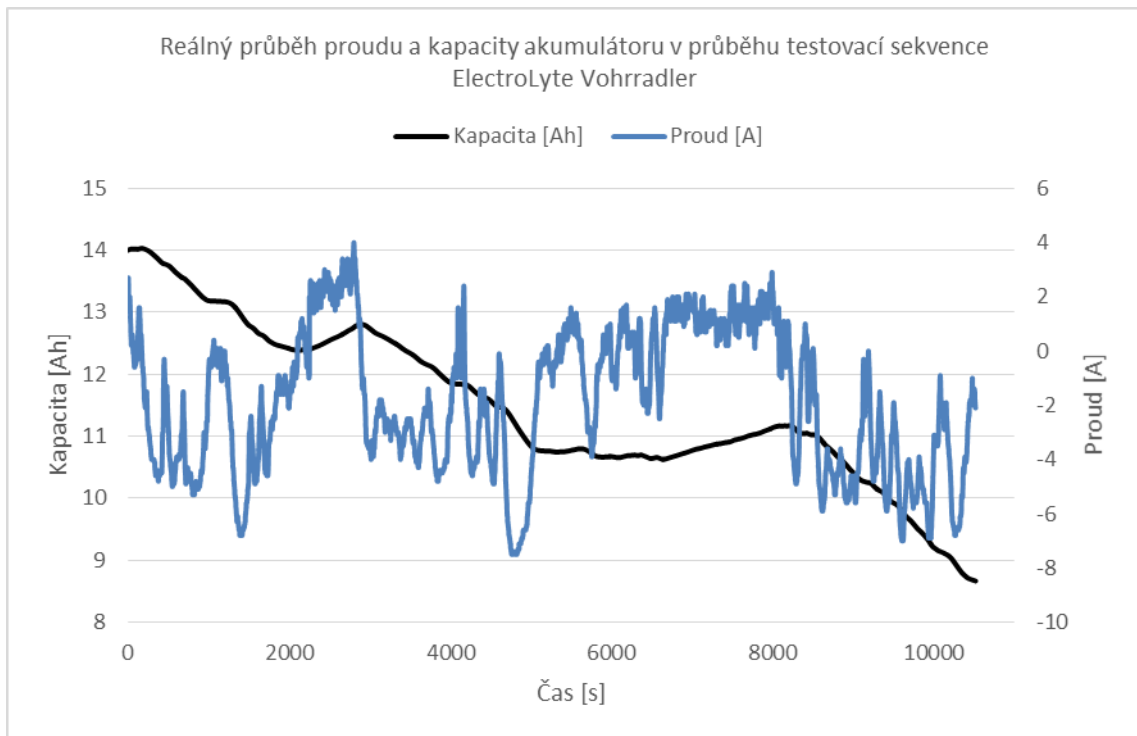
Obr. 52. Odhady klidové hodnoty SOC pomocí standardní metody OCV a průběh relativních chyb těchto odhadů

Při porovnání relativní chyby této metody u obou druhů akumulátorů je patrný poměrně velký rozdíl v přesnosti obou druhů akumulátorů. Tento rozdíl je způsoben samotnou metodou měření napětí článků. U akumulátoru pro elektrokolo je použit precizní integrovaný obvod vybavený plovoucími AD převodníky, zatímco u akumulátoru do záchranného zařízení je měření článků zajištěno pomocí analogového multiplexeru sestaveného s diskretních součástek. Standardní metoda OCV tedy u akumulátoru pro elektrokolo dosahuje přesnosti nad 98%. Průběh odhadu OCV při průchodu proudem nebude v této kapitole prezentován, neboť byla prokázána nepoužitelnost tohoto odhadu již na akumulátoru pro zařízení Lukas StrongArm.

### 8.2.2 Metoda odhadu stavu nabití pomocí integrace proudu

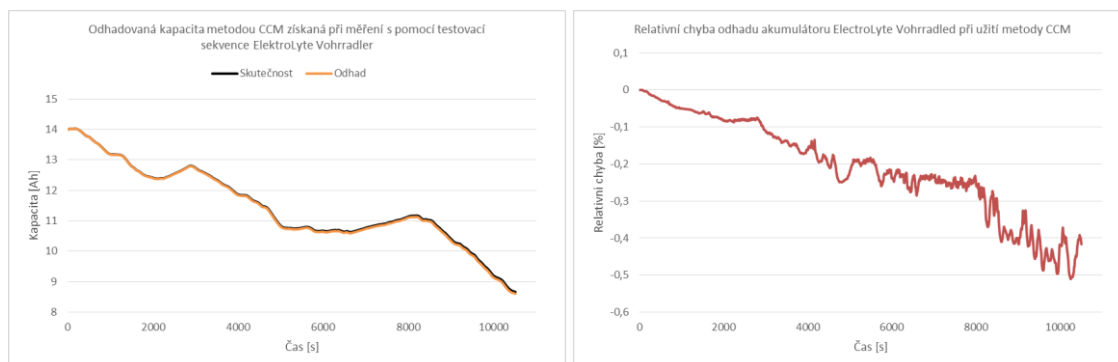
I v případě akumulátoru do elektrokola zde bude nejprve uveden matematicky vypočtený průběh kapacity akumulátoru na základě průběhu proudu testovací sekvence dle kapitoly 7.2.2.2. Předpokládaný průběh kapacity akumulátoru odměřený pomocí

elektronické zátěže EA-EL 9160-300 a elektronického zdroje EA-PSI 8160-60 je uveden na obr. 53.



Obr. 53. Matematický výsledek testovací sekvence dle pro akumulátor do elektr kola ElectroLyte Vohrradler .

Poměrně velká slabina této metody spočívá v offsetu obvodu pro měření proudu násobeném integračním principem metody. Tento fakt byl prokázán již při testech provedených na akumulátoru Lukas StrongArm. Výhodou akumulátoru pro elektrokolo je ale malý rozsah měřeného proudu, a tím pádem velmi dobrá přesnost obvodu pro měření proudu. Při porovnání obou akumulátorů je přesnost měření proudu v případě akumulátoru pro elektrokolo přibližně 15x větší než v případě akumulátoru pro hydraulické zařízení. Tato přesnost na první pohled nahrává této metodě. Porovnání výsledku odhadu kapacity akumulátoru pomocí metody CCM s jeho skutečným průběhem je na obr. 54.



Obr. 54. Průběh odhadu kapacity akumulátoru ElektroLyte Vohrradler a jeho relativní chyby pomocí metody CCM v průběhu testovací sekvence

Na průběhu odhadu je na první pohled patrná jen velmi malá odchylka od skutečného stavu nabití. Graf relativní chyby odhadu ukazuje zanedbatelnou integrační chybu a to i přes to, že akumulátor nebyl v průběhu testu kalibrován pomocí metody OCV. Vzhledem k tomu, že integrační chyba metody dosáhla po 4 hodinovém testu hodnoty přibližně 0,5 %, dá se očekávat, že by chyba této metody přesáhla maximální přípustnou chybu po jízdě trvající přibližně 10x déle, než je délka testovací sekvence. Tedy přibližně po 40 hodinách a ujetí vzdálenosti 310 km. Vzhledem ke zbytkové kapacitě akumulátoru, která po ukončení testovací sekvence činí přibližně 8500 mAh, a spotřebované kapacitě v průběhu testu přibližně 5500mAh, je jen velmi málo pravděpodobné opustit povolené toleranční pásmo odhadu bez dosažení kalibračních podmínek (akumulátor je prázdný nebo akumulátor je plně nabitý). Tato metoda tedy absolutně vyhověla počátečním požadavkům na přesnost odhadu stavu nabití. Na základě naměřených výsledků se dá odhadnout, že tato metoda je pro přesný odhad stavu nabití a akumulátory s malým proudovým rozsahem nejlepší volbou.

### 8.2.3 Metoda odhadu stavu nabití založená na sledování změny vnitřního odporu článků

Bohužel ani v případě akumulátoru určeného do elektrokola se nepodařilo prokázat funkčnost metody odhadu kapacity založené na měření změny vnitřního odporu článků.

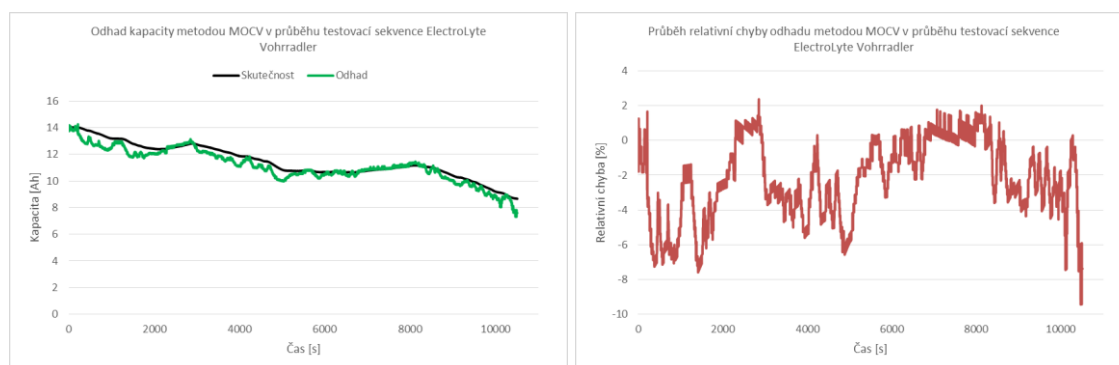
### 8.2.4 Příprava nově navržené metody odhadu stavu nabití z napětí zatíženého článku

Stejně jako v případě akumulátoru pro záchranáře, i pro akumulátor do elektrokola je nutné nadefinovat proudové hladiny a jejich tolerance. Vzhledem k poměrně malému rozptylu vybíjecích a nabíjecích proudů u akumulátoru do elektro-kola je možné odměřit závislosti napětí článků na kapacitě pro proudy od -10 A do +10 A s krokem 1 A. Tímto

rozsahem je možné pokrýt celý pracovní rozsah elektrokola a to jak pro případ pohonu kola, tak pro případ rekuperace kinetické energie a nabíjení pomocí nabíječky. Algoritmus odhadu stavu nabití pomocí metody MOCV již není třeba zdlouhavě ladit, neboť jeho princip je pro všechny akumulátory stejný.

#### 8.2.4.1 Aplikace nově navržené metody odhadu z napětí zatíženého článku na sekvenci ElectroLyte Vohrradler

Změny proudu u akumulátoru do elektrokola jsou mnohem rychlejší než změny u akumulátoru pro pohon hydrauliky. Rovněž se u tohoto použití nemění pouze hodnota proudu, ale často se střídá i směr proudu a akumulátor tak poměrně rychle přechází ze stavu vybití do stavu nabíjení a zpět. Tyto rychlé a nepředvídatelné změny mají za následek poměrně velké zarušení hodnoty stavu nabití akumulátoru. Přesnosti odhadu nepomáhá ani poměrně pomalé vzorkování napětí článků způsobené použitím specializovaných integrovaných obvodů ATA6870 s plovoucími AD převodníky. Výsledek odhadu kapacity pomocí metody MOCV porovnaný s reálným výsledkem průběhu je na obr. 55.



Obr. 55. Srovnání výsledku odhadu metodou MOCV s matematickým výsledkem v průběhu testovací sekvence ElectroLyte Vohrradler

Relativní chyby dosáhla hodnoty 9 %, což je hodnota nad stanovenou mezí přesnosti algoritmu. Přibližně stejná hodnota maxima relativní chyby byla naměřena i v případě použití této metody u tohoto algoritmu u akumulátoru Lukas. Z tohoto hlediska algoritmus MOCV ani zde nesplnil dané zadání. I přes překročení maximální přípustné chyby algoritmu je tato metoda odhadu stavu nabití pro akumulátor určený do elektrokola použitelná a poskytuje poměrně přesný zdroj odhadu a to i za předpokladu pomalejšího vzorkování napětí článků.

### **8.2.5 Kombinace metod odhadu stavu nabití z napětí článku a integrace proudu**

Vzhledem ke skvělému průběhu odhadu kapacity pomocí metody CCM a minimální chybě této metody je metoda OCV pro tento akumulátor zvolena pouze v klasické formě a to pro korekci počátečního stavu nabití při aktivaci akumulátoru tak, jak tomu bylo již od počátku návrhu této metody zamýšleno. Jakákoli kombinace metody CCM s jakoukoli jinou metodou může v tomto případě výsledky odhadu pouze zhoršit.

## 9 Závěr

### 9.1 Shrnutí dosažených výsledků

V práci byla vyvinuta metoda odhadu stavu nabití lithiového akumulátoru použitelná pro levné elektroniky bez precizního měření napětí a proudu. Tento algoritmus byl nazván MOCV. Získání všech dat pro odhad stavu nabití akumulátoru pomocí metody MOCV je velice zdlouhavý proces. Použitím této metody však může být při některých aplikacích dosaženo větší přesnosti než při použití jiné konvenční metody. Domnívám se, že v práci bylo prokázáno, že metoda MOCV však současně není vhodná pro všechny aplikace akumulátorů. Programátor si tak musí uvědomit, jaké přesnosti musí navrhovaný systém dosahovat a jaké přesnosti dosáhne použitím standardních metod odhadu při respektování využitého HW. Na druhou stranu je metoda MOCV u levných elektronik sama o sobě relativně přesným zdrojem odhadu stavu nabití, její slabina však spočívá v poměrně přesném definování diskrétních proudových hladin. Tato vlastnost může být nebezpečná v případě použití akumulátoru v kombinaci s jiným zařízením. Proudová hladina se může také změnit vlivem stárnutí napájeného zařízení či samotného akumulátoru. Metoda MOCV je však robustnější proti rušení vlivem teplotního offsetu systému pro měření proudu a proti rušení vznikajícímu vlivem velkých rozběhových proudů napájených zařízení.

Aplikací výsledků provedeného výzkumu bylo dosaženo zefektivnění a zpřesnění odhadu stavu nabití pro levné elektroniky s omezenými schopnostmi měření napětí a proudu. Navržený algoritmus není zároveň náročný na výpočetní výkon a je tak vhodný i do elektronik s nízkou spotřebou elektrické energie.

### 9.2 Zhodnocení jednotlivých metod odhadu pro akumulátoru do záchranného zařízení Lukas

V rámci této práce byly hodnoceny metody odhadu stavu nabití pomocí metod CCM, OCV, BIR, již zmíněné navržené nové metody MOCV a kombinace těchto metod.

Relativní chyba metody CCM na celém průběhu testovací sekvence, skládající se ze 47 pracovních cyklů hydraulického zařízení a čtyřech nedokončených nabíjecích cyklech (o celkové délce aktivní fáze testovací sekvence 4 hodiny a 35 minut), dosahovala v nejhroším případě hodnot 21 %. Tento test je však mnohem horší než jakýkoliv reálný provoz akumulátoru. V reálném testu akumulátorů dosahovala maximální hodnota

relativní chyby algoritmu CCM 10 %. Na přesnost této metody má poměrně velký vliv zarušení napájecího napětí elektroniky, jež roste s rostoucím odebíraným proudem z akumulátoru a frekvencí jeho změn.

Testování metody OCV přineslo výsledky srovnatelné s předpokladem z teorie. Tato metoda je velmi přesná a při přesném odměření charakteristiky článků a dodržení minimálních časů pro ustálení napětí se dá dosáhnout jen velmi malé chyby odhadu. Tato chyba se dá dále minimalizovat odměřením charakteristiky článku na prázdko v napěťovém pracovním rozsahu daného využití akumulátoru a kalibrováním systému pro měření napětí článků. V tomto případě se maximální hodnota relativní chyby této metody na akumulátoru Lukas StrongArm pohybovala do 3 %.

Relativní chyba metody MOCV na celém průběhu testovací sekvence dosahovala v nejhroším případě hodnot 8 %. V reálném testu akumulátorů dosahovala maximální hodnota relativní chyby algoritmu MOCV srovnatelné hodnoty. Prokázanou výhodou této metody je velmi malá citlivost na zarušení hodnot měřených pomocí AD převodníku, které může být způsobeno například šumem napájecího napětí elektroniky vznikajícím při velkých změnách proudu odebíraného z elektroniky.

U metody BIR se bohužel nepodařila prokázat její funkčnost a to ani za použití přesného laboratorního vybavení.

Relativní chyba kombinace metod na celém průběhu testovací sekvence dosahovala v přechodovém stavu hodnoty 8 % a to po dobu 2 sekund. V ustáleném stavu byla naměřena maximální hodnota relativní chyby na hodnotě 3%. V reálném testu akumulátorů dosahovala maximální hodnota relativní chyby kombinovaného odhadu hodnoty 6 %. Chyba 6 % splňuje daný cíl práce a to s přihlédnutím k faktu, že je chyba dosaženo pouze v přechodovém stavu hydraulického zařízení, a tedy v čase, kdy se uživatel musí věnovat jiné činnosti při práci s hydraulickým zařízením a nemá již prostor podrobně se věnovat stavu nabití akumulátoru. Vylepšený algoritmus odhadu byl nasazen do dalších akumulátorů určených pro záchranná zařízení.

V případě poškozeného akumulátoru se při použití výsledné kombinované metody odhadu nejvíce projevila integrační chyba metody CCM, která je způsobena poklesem kapacitou akumulátoru. Tato chyba do odhadu zanesla chyby +5 %. Rušení způsobené metodou MOCV způsobilo v ustáleném stavu chybu +4 %. Maximální hodnota relativní



chyby kombinovaného odhadu v ustáleném stavu byla 9%, což je přibližně dvojnásobek povolené chyby. Zvýšená velikost relativní chyby má v tomto případě pouze orientační charakter, neboť byl test proveden na dvojici silně poškozených akumulátorů a parametry algoritmu pro odhad kapacity pomocí metody CCM nebyly ustáleny vlivem přeprogramování ochranné elektroniky. K ustálení parametrů po přeprogramování elektroniky by v případě takto poškozeného akumulátoru došlo přibližně po deseti plných cyklech akumulátoru.

### **9.3 Zhodnocení jednotlivých metod odhadu pro akumulátor do elektro-kola Electrolyte**

Relativní chyba metody CCM na celém průběhu testovací sekvence dosahovala v nejhorším případě hodnot 0,5 %. V reálném testu akumulátorů dosahovala maximální hodnota relativní chyby algoritmu CCM 3%. Větší chyba v reálném testu akumulátoru je způsobena větší rychlostí a četností změn proudů. V laboratorním testu byla rychlost změn proudu limitována minimálním časem řízení elektronické zátěže (500 ms).

Minimální hodnota úspěšnosti odhadu stavu nabití pomocí metody OCV u akumulátoru do elektrokola v průběhu celého testu dosáhla hodnoty 98,5 %. Téměř zanedbatelná odchylka této metody byla způsobena velmi precizním měřením napětí všech článků v akumulátoru, jež bylo zajištěno pomocí integrovaného obvodu s plovoucími AD převodníky.

Relativní chyba metody MOCV dosahovala v laboratorních podmínkách i v reálném testu v nejhorším případě hodnoty 8 %. Metoda však nebyla na tomto akumulátoru plně odladěna, neboť bylo již na první pohled zřejmé, že u tohoto využití akumulátoru se nedá překonat úspěšnost metody CCM.

Integrační chyba metody CCM dosáhla po 4 hodinovém testu hodnoty přibližně 0,5 %. K dosažení maximální přípustné chyby by tedy s největší pravděpodobností došlo po jízdě trávající přibližně 10x déle a to bez zastavení elektro-kola. Pravděpodobnost opuštění tolerančního pásma odhadu stavu nabití je tedy u této metody zanedbatelná. Tato metoda tedy absolutně vyhověla počátečním požadavkům na přesnost odhadu stavu nabití.

Ani u tohoto akumulátoru se nepodařila prokázat funkčnost metody BIR.

Relativní chyba kombinace metod dosahovala v nejhorším případě hodnoty 6 %. Tuto chybu je možné snížit odladěním algoritmu MOCV. Dá se očekávat, že by výsledný odhad splnil počáteční kritéria na velikost relativní chyby pod 5%. Tento odhad by ovšem v žádném případě nedosahoval kvalit odhadu CCM.

Pro tento akumulátor je tedy nejvhodnější využít kombinace standardní metody OCV a metody CCM, kdy metoda OCV je využita pro odhad kapacity ve stavu nečinnosti a za jízdy je využita standardní metoda CCM. Takovýto odhad splňuje daný cíl a dosahuje chyby do 2 % na celém pracovním rozsahu akumulátoru.

#### **9.4 Slabiny využití elektronik pro ochrany lithiových akumulátorů**

Dlouhodobý test akumulátorů vybavených elektronikou pro jejich ochranu s vypnutým systémem pro balancování článků pomohl odhalit vliv měření článků na jejich rozbalancování. Zatímco aktuální kapacita jednotlivých článků v akumulátoru bez elektroniky pro jeho ochranu zůstala v průběhu celého testu shodná, v akumulátorech vybavených elektronikou byla kapacita jednotlivých článků ovlivněna měřením. Na konci testu byla kapacita uložená v prvním článku zhruba o 1 až 2 % nižší než kapacita uložená v posledním článku. Toto zjištění vedlo k zavedení opatření pro eliminaci vlivu rozbalancování článků, a to prostřednictvím úpravy algoritmů pro jejich měření.

#### **9.5 Směřování dalšího vývoje**

Jeden z nejdůležitějších cílů do budoucna je obohatit firmware elektroniky o implementaci kompletního protokolu pro SMBus. Tento protokol umožní jednak sledování všech parametrů akumulátoru ve standardizovaném formátu a jednak snadnou změnu všech parametrů akumulátoru včetně sériového čísla a dalších důležitých identifikačních parametrů akumulátoru.

Dalším důležitým cílem do budoucna je snížení spotřeby ochranné elektroniky akumulátoru. Aktuální spotřeba elektroniky vyháží ze zastaralého osmibitového procesoru se spotřebou v řádu jednotek miliampér. Největší úspory tedy lze dosáhnout změnou procesoru za moderní procesory s ARM jádrem. Tímto způsobem lze dosáhnout téměř zanedbatelné spotřeby jednotek mikroampér. Výhoda takto výrazného snížení spotřeby spočívá zejména ve vyřazení režimu spánku v době neaktivní zátěže a tím pádem trvalého monitorování akumulátoru a přesný údaj o čase stráveném v aktivní i pasivní fázi

akumulátoru. S tím souvisí i zpřesnění metody OCV nejen vlivem přesného vnímání času, ale také teplotních podmínek ve všech fázích akumulátoru.

## Použitá literatura a zdroje informací

- [1] PANASONIC, *Find the right battery for your application* [online], 26s., [vid. 19\_06\_2016].  
Dostupné z: <http://www.omnitron.cz/download/Panasonic%20p%C5%99ehledov%C3%BD%20katalog%202014.pdf>
- [2] SBS, *Smart Battery Data Specification* [online], Revision 1.1, 54s., [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: <http://sbs-forum.org/specs/sbdat110.pdf>
- [3] SMBus, *SMBus Control Method Interface Specification* [online], Version 1.0, 41s., [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: [http://smbus.org/specs/smbus\\_cmi10.pdf](http://smbus.org/specs/smbus_cmi10.pdf)
- [4] SMBus, *System Management Bus (SMBus) Specification* [online], Version 2.0, 59s., [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: <http://smbus.org/specs/smbus20.pdf>
- [5] SMBus, *System Management Bus (SMBus) Specification* [online], Version 3.0, 85s., [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: [http://smbus.org/specs/SMBus\\_3\\_0\\_20141220.pdf](http://smbus.org/specs/SMBus_3_0_20141220.pdf)
- [6] ELECTRO AUTOMATIC, *EA-EL 9000/AE-EL 9000 HP 2400W – 7200W Electronic DC load* [online], 8s., [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: [http://shop.elektroautomatik.de/shop/dos2/Web/Datenblaetter/datasheet\\_el9000.pdf](http://shop.elektroautomatik.de/shop/dos2/Web/Datenblaetter/datasheet_el9000.pdf)
- [7] ELECTRO AUTOMATIC, *EA-PSI 8000 2U 640W – 3000W Programmable laboratory DC power supplies* [online], 6s., [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: [http://shop.elektroautomatik.de/shop/dos2/Web/Datenblaetter/datasheet\\_psi8000-2u.pdf](http://shop.elektroautomatik.de/shop/dos2/Web/Datenblaetter/datasheet_psi8000-2u.pdf)
- [8] ELECTRO AUTOMATIC, *Easy Load Lite v2.05* [software]. [přístup 19\_06\_2016].  
Dostupné z: <http://www.elektroautomatik.de/en/easyloadlite.html>
- [9] ELECTRO AUTOMATIC, *Easy Power Lite v3.02* [software]. [přístup 19\_06\_2016].  
Dostupné z: <http://www.elektroautomatik.de/en/easypowerlite.html>
- [10] LUKAS, *LE 100 StrongArm* [online], 4s., [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: <http://rescue.lukas.com/Rescue+products/Datenblatt-pdfid-1576-overwrite-1-chdate-1-click-frontend.html>
- [11] LUKAS, *LE 100 StrongArm* [online], [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: [http://rescue.lukas.com/strongarm\\_le100-path-4,34.html](http://rescue.lukas.com/strongarm_le100-path-4,34.html)
- [12] ELECTROLYTE, *Vorradler S3* [online], [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: <http://electrolyte.bike/en/bicycles/36-volt-bikes/vorradler-das-tourenrad/>
- [13] GO SWISSDRIVE, *Go-swissdrive display* [online], [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: <http://www.go-swissdrive.com/en/the-go-swissdrive-system/display/>
- [14] POLAR, *V800* [online], 110s., [vid. 19\_06\_2015].  
Dostupné z: [http://support.polar.com/e\\_manuals/V800/Polar\\_V800\\_user\\_manual\\_English/manual.pdf](http://support.polar.com/e_manuals/V800/Polar_V800_user_manual_English/manual.pdf) <http://rescue.lukas.com/Rescue+products/Datenblatt-pdfid-1576-overwrite-1-chdate-1-click-frontend.html>

- [15] FLUKE, *Fluke 115* [online], 2s., [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0802/0900766b80802a0c.pdf>  
<http://rescue.lukas.com/Rescue+products/Datenblatt-pdfid-1576-overwrite-1-chdate-1-click-frontend.html>
- [16] CLIMA TEMPERATUR SYSTEME, *CTS-Climatic Test Chambers* [online], 2s., [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: [http://www.cts-umweltsimulation.de/products/datasheets/CTS\\_Climatic\\_Test\\_Chambers\\_eng.pdf](http://www.cts-umweltsimulation.de/products/datasheets/CTS_Climatic_Test_Chambers_eng.pdf)  
<http://rescue.lukas.com/Rescue+products/Datenblatt-pdfid-1576-overwrite-1-chdate-1-click-frontend.html>
- [17] PINKER, J. KOUCKÝ, V. *Analogové elektronické systémy 1. část. - 3. vyd – Plzeň : Západočeská univerzita, 2004. - 142 s. ISBN 80-7043-284-5 (1.část).*
- [18] PINKER, J. KOUCKÝ, V. *Analogové elektronické systémy 2. část. - 3. vyd – Plzeň : Západočeská univerzita, 2004. - 143-306 s. ISBN 80-7043-284-5 (2.část).*
- [19] TRINH, F. A. *Method for Evaluating Battery State of Charge Estimation Accuracy* Gothenburg, Sweden 2012, 2012. Master's Thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [20] CHIASSERINI, C. F., RAO, R. R. *Energy efficient battery management*, IEEE J. on Selected Areas in Communications, s. 1235–1245, 2001.
- [21] CHIASSERINI, C. F., RAO, R. R. *Routing protocols to maximize battery efficiency*, in Proc. of Milcom, s. 496–500, 2000.
- [22] PANG, S., FARRELL, J., DU, J., BARTH, M. *Battery state-of-charge estimation*, in Proc. Amer. Control Conf, s. 25–27, 2001.
- [23] CHIASSON, J., VAIRAMOHAN, B. *Estimating the state of charge of a battery*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, s. 465–470, 2004.
- [24] POP, V., BERGVELD, H.J., NOTTEN, P.H.L., Regtien, P.P.L. *State-of-charge indication in portable applications*, In IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2005, Dubrovnik, Croatia, s. 1007-1012. ISBN 0-7803-8738-4.
- [25] TEXAS INSTRUMENTS, *Challenges and Solutions in Battery Fuel Gauging* [online], 10s., [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slyp086/slyp086.pdf>
- [26] ELECTROPEDIA. *State of Charge (SOC) Determination* [online], [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/soc.htm>
- [27] BATTERY UNIVERSITY, *How to Measure State-of-charge* [online], [vid. 19\_06\_2015]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_state\\_of\\_charge](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge)
- [28] MORSTYN, T., MOMAYYEZAN, M., HREDZAK, B., AGELIDIS, V.G. *Distributed Control for State-of-Charge Balancing Between the Modules of a Reconfigurable Battery Energy Storage System*, IEEE Transactions on Power Electronics, s. 7968-7995, 2015.

- [29] AFFANNI, A., BELLINI, A., CONCARI, C., FRANCESCHINI, G., LORENZANI, E., TASSONI, C. *EV battery state of charge: neural network based estimation* IEEE International, s. 684-688, 2003.
- [30] MINGYU, G., YUANYUAN, L., ZHIWEI, H. *Battery state of charge online estimation based on particle filter*, Image and Signal Processing (CISP), s. 2233-2236, 2011.
- [31] LINDEMARK, B. *Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance*, International Telecommunications Energy Conference, s.196-201
- [32] PILLER, S., PERRIN, M., JOSSEN, A. *Methods for state-of-charge determination and their applications*, Journal of Power Sources, s.113-120, 2001

## Seznam autorových publikovaných prací

- [1] KŘIBSKÝ, P. *Systém pro vyhodnocování pohybu a polohy*. In Elektrotechnika a informatika 2009. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. s. 87-90. ISBN: 978-80-7043-809-1. STAŽ VE SBORNÍKU
- [2] KŘIBSKÝ, P. *Softwarové řešení pro systém měření teplot*. In Elektrotechnika a informatika 2010. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. s. 81-84. ISBN 978-80-7043-914-2. STAŽ VE SBORNÍKU
- [3] VALDA, L., KŘIBSKÝ, P. *Řídící jednotka systému pro měření teplot*. In Elektrotechnika a informatika 2010. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. s. 115-118. ISBN 978-80-7043-914-2. STAŽ VE SBORNÍKU
- [4] KŘIBSKÝ, P. *Softwarové řešení pro aktivní uzavřené filtry pevných částic dieselových motorů s elektrickým systémem regenerace*. In Elektrotechnika a informatika 2011. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 65-68. ISBN: 978-80-261-0015-7. STAŽ VE SBORNÍKU
- [5] VALDA, L., Křibský, P. *Bezdrátové propojení sběrnic pro měření a ovládání - Hardwarové řešení*. In Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 139-142. ISBN: 978-80-261-0232-8. STAŽ VE SBORNÍKU
- [6] KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P., SALOM, R., VALDA, L. *Wireless Interconnection of Buses for Measurement and Control*. In Telofoor. 2012. STAŽ VE SBORNÍKU
- [7] KŘIBSKÝ, P., VALDA, L. *Bezdrátové propojení sběrnic pro měření a ovládání – softwarové řešení*. In Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 81-84. ISBN: 978-80-261-0232-8. STAŽ VE SBORNÍKU
- [8] VALDA, L., KŘIBSKÝ, P., KOSTURIK, K. *Testování aktivních uzavřených filtrů pevných částic s elektrickým systémem regenerace*. In Electroscope. 2012. ČLÁNEK DO ČASOPISU
- [9] KŘIBSKÝ, P., ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., VALDA, L. *Li-Ion State of Charge Estimation Methods*. 2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers,649-651. STAŽ VE SBORNÍKU
- [10] VALDA, L., KŘIVKA, J., KŘIBSKÝ, P., ŽAHOUR, J. *Replacement of the Mains Voltage by Reconfigurable Li-ion Battery for 4kW Power Inverter*. 2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers,645-648. STAŽ VE SBORNÍKU
- [11] KŘIVKA, J., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., ŽAHOUR, J. *Autonomous Control System of Electrically Regenerable Diesel Particulate Filter for Light Duty Vehicles*. 2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers,706-709. STAŽ VE SBORNÍKU

- [12]ŽAHOUR, J., KŘIVKA, J., KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L. *Electrical glowing of filtering elements in the DPF filter*. 2014 22nd TELECOMMUNICATIONS FORUM - (TELFOR) Proceedings of Papers,710-712. STAŤ VE SBORNÍKU



## Funkční vzorky

- [13]KŘIBSKÝ, P. *Systém pro vyhodnocování pohybu a polohy*. 2009. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK
- [14]KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P. *Analyzační a vizualizační software*. 2010.
- [15]KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., *Dataloger Citroen*. 2011. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK
- [16]KOSTURIK, K., KŘIBSKÝ, P., VALDA, L. *Jednotka Charger*. 2011. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK
- [17]KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., KOSTURIK, K. *Elektronická ochrana pro Li-xx články v zapojení 1-4S*. 2012. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK.
- [18]KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., KOSTURIK, K. *Elektronická ochrana 4S Li-xx akumulátoru s možností odepnutí záporného pólu zátěže*. 2012. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK.
- [19]KŘIBSKÝ, P., VALDA, L., KOSTURIK, K. *Elektronická ochrana 4S Li-xx akumulátoru s možností odepnutí záporného pólu nabíječky a zátěže*. 2012. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK.
- [20]VALDA, L., KŘIBSKÝ, P., KOSTURIK, K. *Elektronická ochrana 7S Li-xx akumulátoru s možností odepnutí záporného pólu nabíječky a zátěže*. 2012. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK.
- [21]VALDA, L., KŘIBSKÝ, P., KOSTURIK, K. *Elektronická řídicí jednotka 14S Li-xx akumulátoru s datovou komunikací CAN bus*. 2012. PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK.

## **Výčet pedagogické a vědecké činnosti autora**

Podíl na řešení projektu pro ministerstvo průmyslu a obchodu MPO FR-TI1/089.

Podíl na řešení projektu pro ministerstvo průmyslu a obchodu MPO FR-TI4/114.

Podíl na řešení projektu TA04020987 „Zvýšení energetické účinnosti systému nabíjení a ochrany Li-Ion“. Projekt je aktivní do roku 2017 a probíhá za spolupráce firmy Bech Akku Power baterie s.r.o., Vysoké učení technické v Brně a firmy Tesla Blatná, a.s.

Vedení cvičení předmětů KAE/PEL a KAE/MPP v akademických letech 2008/2009 až 2012/2013.

Vedení cvičení předmětů KAE/UET a KAE/ZEK v akademických letech 2010/2011 až 2012/2013.

Pravidelné vedení diplomových a bakalářských prací v akademických letech 2009/2010 až 2012/2013.

Příprava expozic pro „Dny vědy a techniky“ a „Dny otevřených dveří“ 2010, 2011 a 2012.

Organizace konference „Elektronika a Informatika“ v Nečtinech v letech 2011 a 2012.

## **Výčet odborné nepedagogické činnosti autora**

Výroba DPS v rámci KAE/ZČU zejména pro diplomové a bakalářské práce a semestrální projekty.

Účast na grantu SGS-2012-037 „Materiálové, elektronické, technologické a řídicí systémy v Elektrotechnice“ od 1.4.2010 do 31.12.2011.

Účast na grantu SGS-2012-019 „Moderní řešení elektronických řídicích a informačních systémů“ od 1.4.2012 do 31.12.2014.

Dlouhodobá 7 letá spolupráce s německou společností Bech Akkupower GmbH a zahraničními partnery z celého světa za účelem návrhu a výroby hardware a software pro ochrany lithiových akumulátorů. Celková délka zahraničních výjezdů v rámci řešení vývoje HW a SW s partnerskými společnostmi přesahující 3 roky.