



Univerzita  
Pardubice  
Dopravní fakulta  
Jana Pernera

# **UNIVERZITA PARDUBICE**

## **DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

### **NÁVRH A OPTIMALIZACE BATERIOVÉHO SYSTÉMU PRO KOLEJOVÉ VOZIDLO**

Disertační práce

2017

Ing. Ondřej Sadílek

**Studijní program:**

P3710 – Technika a technologie v dopravě a spojích

**Studijní obor:**

3706V005 – Dopravní prostředky a infrastruktura

**Školitel:**

doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D

**Pracoviště:**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

## **ANOTACE**

Disertační práce se zabývá problematikou akumulátorově napájených kolejových vozidel. Práce obsahuje několik částí. První část je zaměřena na teoretické přiblížení problematiky samotných akumulátorů energie, jejich provozní vlastnosti, výhody a nevýhody v souvislosti s dopravní technikou. Dále práce obsahuje rozbor obvodových modelů článků včetně určení nejvhodnějšího v souvislosti s dostatečnou přesností a únosnou složitostí parametrizace. Další části pak popisují proces parametrizace zvoleného modelu na základě experimentálně zjištěných dat a optimální metodiky. Poslední část se zabývá vytvořením simulačního modelu, validací jeho přesnosti s daty naměřenými na reálném vozidle a možnostmi uplatnění pro rozvoj vědní disciplíny a praxe.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Akumulátor, železniční vozidlo, akumulátorový systém, BMS, simulační model

## **TITLE**

The proposal and optimization of the railway vehicle battery system

## **ANNOTATION**

Dissertation deals with battery powered vehicles. The thesis contains several parts. The first part focuses on the theoretical approach the issue of battery cells, their operational characteristics, advantages and disadvantages in relation to transport equipment. The work includes analysis of circuit models of cells including determining the most appropriate in the context of sufficient accuracy and easy parameterization. Another section describes the parameterization process model chosen on the basis of experimental data and optimal methods. The last part deals with the creation of a simulation model, validating the accuracy of the data measured on a real vehicle and opportunities for the development of the discipline and practice.

## **KEYWORDS**

Accumulator, railway vehicle, accumulator system, battery management system, simulations model

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>6</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV ZKOUMANÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>9</b>
1.1 Historie a současný stav akumulátorových vozidel .....	9
1.2 Trakční akumulátory a jejich specifikace .....	12
1.2.1 Akumulátory energie .....	12
1.3 Základní vlastnosti a parametry elektro-chemických akumulátorů .....	14
1.3.1 Napětí .....	14
1.3.2 Energie, Kapacita .....	15
1.3.3 Vnitřní odpor .....	15
1.3.4 Vybíjecí proud .....	16
1.3.5 Výkon .....	16
1.3.6 Životnost .....	17
1.3.7 Pracovní teplota .....	18
1.4 Lithiové akumulátory .....	18
1.5 Dostupné technologie lithiových akumulátorů .....	20
1.5.1 Technologie LCO – Li-ion .....	20
1.5.2 Technologie NMC Li-ion .....	20
1.5.3 Technologie LMO Li-ion .....	21
1.5.4 Technologie LFP Li-ion .....	21
1.5.5 Technologie NCA – Li-ion .....	22
1.5.6 Technologie LTO – Li-ion .....	23
1.5.7 Technologie SLPB – Li-pol .....	23
1.6 Porovnání vybraných akumulátorů .....	24
1.7 Obvodové modely Li-ion akumulátorů .....	24
1.7.1 $R_i$ model .....	25
1.7.2 Theveninův model .....	26
1.7.3 Modifikovaný Theveninův model .....	27
1.7.4 RC model .....	28
1.7.5 Theveninův DP model .....	28
1.7.6 Modely zohledňující samovybití .....	29
1.8 Možnosti simulace akumulátorového systému .....	29
1.8.1 Matlab .....	30

1.8.2	Matlab – Simulink .....	31
1.9	Návrh metodiky pro optimalizaci akumulátorového systému vozidla.....	34
<b>2</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>PŘEHLED ZVOLENÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>37</b>
3.1	Definování vhodné struktury a parametrů modelu článku.....	37
3.2	Experimentální laboratorní testy .....	38
3.2.1	Definování konkrétního předmětu laboratorních testů .....	39
3.2.2	Popis měřicího pracoviště.....	43
3.2.3	Volba metodiky měření s ohledem na vybraný model článku.....	49
3.2.4	Postup separace dynamického odporu a kapacity z naměřených průběhů .....	54
3.2.5	Sumarizace výsledků z laboratorního měření .....	57
3.3	Experimentální testy na vozidle .....	67
3.3.1	Popis experimentálního vozidla.....	67
3.3.2	Popis akumulátorového systému .....	70
3.3.3	Měření na akumulátorovém systému vozidla .....	76
3.4	Simulační model článku a potřebné výpočty .....	78
3.4.1	Simulační model článku.....	80
3.5	Zhodnocení výsledků z vozidla a z laboratoře.....	83
3.5.1	Parametrizace simulačního modelu .....	83
3.5.2	Validace laboratorních výsledků .....	84
3.5.3	Validace výsledků z vozidla .....	88
3.5.4	Sumarizace výsledků z laboratoře a vozidla.....	92
3.6	Zobecnění výsledků pro aplikaci v simulačním modelu vozidla.....	95
<b>4</b>	<b>VÝZNAM VÝSLEDKŮ PRO VĚDU A PRAXI.....</b>	<b>96</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>98</b>
	Použitá literatura .....	101
	Seznam obrázků .....	103
	Seznam tabulek .....	105
	Publikační činnost související s tématem disertační práce .....	106
	Přílohy.....	108
	• Měřené charakteristiky článků.....	108
	• Výpis programu simulačního modelu článku v prostředí Matlab.....	112
	• Aproximace dynamické odezvy článků v prostředí CF Tool .....	116

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

- $w_{\text{hmotnostní}}$  - hmotnostní hustota energie [Wh/kg]  
 $A_{\text{media}}$  - využitelná energie media [Wh]  
 $m_{\text{media}}$  - hmotnost media [kg]  
 $w_{\text{media}}$  - objemová hustota energie [Wh/dm<sup>3</sup>]  
 $V_{\text{media}}$  - objem media [dm<sup>3</sup>]  
 $P_{\text{disponibilní}}$  - disponibilní výkon media [W]  
 $w_{\text{výkonová}}$  -výkonová hustota [W/kg]  
SOC - stav nabití [%]  
DOD - hloubka vybití [%]  
 $n$  - počet článků [-]  
 $U_{\text{požadované}}$  - požadované napětí akumulátorové baterie [V]  
 $U_{\text{článku\_jmen}}$  - jmenovité napětí článku [V]  
 $W$  - energie článku [Wh]  
 $C$  - kapacita článku [Ah]  
 $P_{\text{ztrátový}}$  - ztrátový výkon na vnitřním odporu článku [W]  
 $R_i$  - vnitřní odpor článku [ $\Omega$ ]  
 $I$  - elektrický proud [A]  
 $P_{\text{odebraný}}$  -výkon odebraný zátěží z článku [W]  
 $\eta$  - účinnost [%]  
 $U_i$  - napětí článku naprázdno [V]  
 $U_{i0}$  - napětí článku naprázdno při plném stavu nabití [V]  
 $R_{i0}$  - vnitřní odpor článku ve stavu plného nabití [ $\Omega$ ]  
 $A, B$  - konstanty [-]  
 $R_d$  - dynamický vnitřní odpor článku [ $\Omega$ ]  
 $C_d$  - dynamická kapacita článku [F]  
 $R_s$  - sériový vnitřní odpor článku [ $\Omega$ ]  
 $E_{\text{charge}}$  – napětí článku závislé na vybíjecím proudu [V]  
 $E_0$  – napětí článku na prázdko [V]  
 $K$  – polarizační konstanta [ $\text{Ah}^{-1}$ ] či polarizační odpor [Ohm]  
 $Q$  – maximální kapacita článku [Ah]  
 $i$  – odebíraný proud [A]  
 $i^*$  - filtrovaný vybíjecí proud [A]  
 $t$  – čas [h]  
 $it$  – odebraná kapacita z článku za dobu  $t$  při proudu  $i$  [Ah]  
 $A$  – exponenciální napětí [V]  
 $B$  – exponenciální kapacita [ $\text{Ah}^{-1}$ ]

$E_0(T)$  – teplotně závislé napětí článku na prázdko [V]  
 $K(T)$  – teplotně závislá polarizační konstanta [ $\text{Ah}^{-1}$ ] či polarizační odpor [Ohm]  
 $Q(T_a)$  – teplotně závislá maximální kapacita článku [Ah]  
 $C$  – strmost vybíjecí charakteristiky [V/Ah]  
 $T$  – teplota článku [K]  
 $T_a$  – teplota okolí [K]  
 $U_{\text{akubaterie\_jmen}}$  - napětí akumulátorové baterie [V]  
 $P_{A,B}$  - odebíraný výkon na svorkách A a B [W]  
 $I_{\text{trakční}}, I_{\text{vybíjecí}}$  - trakční proud [A]  
 $A_{\text{potřebná}}$  - potřebná energie akumulátorové baterie [Ah]  
 $\eta_{\text{vyb}}$  - účinnost vybíjení [%]  
 $C_{\text{akubat\_jmen}}$  - potřebná kapacita akumulátorové baterie [Ah]  
 $C_{\text{výsledná}}$  - výsledná kapacita akumulátorové baterie [Ah]  
 $U$  - elektrické napětí [V]  
 $\Delta U_{5-15\text{min}_5\% \text{DOD}}$  - rozdíl dynamické odezvy napětí pro 5 a 15 minut relaxace [V]  
 $\Delta U_{15\text{min}_5\% \text{DOD}}$  - velikost dynamického napětí dopovídající 15 minutové relaxaci [V]  
 $\Delta U_{5\text{min}_5\% \text{DOD}}$  - velikost dynamického napětí odpovídající 5 minutové relaxaci [V]  
 $\Delta U_{5-15\text{min\_prumer}}$  - průměrná hodnota rozdílu dynamické odezvy napětí pro 5 a 15 minut [V]  
 $U_{\text{Cd,Rd}_80\% \text{DOD}}$  - dynamické napětí odpovídající 15 minutové relaxaci [V]  
 $U_{\text{Ta}_5\text{min}}$  - velikost dynamického napětí po 5 minutové relaxaci [V]  
 $U_d$  - velikost dynamického napětí [V]  
 $\tau$  - časová konstanta [s]  
 $u_c(t)$  - napětí na kondenzátoru v čase  $t$  [V]  
 $U_{\text{Cmax}}$  - maximální napětí na kondenzátoru [V]  
 $b$  - koeficient odpovídající časové konstantě [s]  
 $U_{\text{cell}}$  – svorkové napětí článku [V]  
 $U_i(\text{DOD}, T)$  - vnitřní napětí článku (svorkové napětí bez zatížení) závislé na DOD, I a T [V]  
 $U_{\text{Rs}}(\text{DOD}, I, T)$  - napětí na sériovém vnitřním odporu závislé na DOD, I a T [V]  
 $U_{\text{Rd}}(\text{DOD}, I, T)$  - napětí na dynamickém vnitřním odporu závislé na DOD, I a T [V]  
 $I_{\text{Rd}}$  - proud procházející dynamickým vnitřním odporem [A]  
 $I_{\text{Cd}}$  - proud procházející dynamickou kapacitou [A]  
 $u_{\text{Rd}}(t)$  - okamžitá hodnota napětí na dynamickém vnitřním odporu [V]  
 $u_{\text{obecné}}(t)$  - obecné řešení diferenciální rovnice [V]  
 $u_{\text{partikulární}}$  – partikulární řešení diferenciální rovnice [V]  
 $K$  - integrační konstanta  
 $\lambda$  - kořen rovnice

# ÚVOD

Současná moderní společnost a trendy jejího vývoje mimo jiné zasahují do oblasti dopravy. S rozšiřující se populací ruku v ruce roste i využívaný počet dopravních prostředků, přičemž každý z nich je nutno nějakým optimálním způsobem napájet – dodat vozidlu energii. Má-li vozidlo uskutečňovat svůj provoz v nezávislém režimu na externím zdroji energie, musí tato energie být na palubě onoho vozidla nějakým způsobem umístěna. Majoritní zástupce pro silniční dopravu tvoří bezesporu fosilní paliva v součinnosti se spalovacím motorem. V případě kolejové dopravy a její závislé elektrické trakce tvoří majoritní zdroj energie elektřina, v případě nezávislé trakce dominují opět fosilní paliva.

Státní energetická koncepce České republiky preferuje posilování využití obnovitelných zdrojů energie (solární elektrárny, bioplynové stanice, větrné elektrárny, apod.) a snížení závislosti na ropných produktech, přičemž nejsilnější oblastí využití paliv na bázi ropných produktů je doprava. Oblast dopravy tedy tvoří zásadní prvek ve velké množině spotřebitelů ropných produktů, kde dokonce možnost alespoň částečné změny připadá v úvahu. Technologický rozvoj elektrických zařízení 21. století již napovídá, že je možno jako vhodnou alternativu fosilních paliv uvažovat energii elektrickou. Elektřina představuje velice univerzální formu energie, kterou je možno v současné době účinně měnit, řídit či dávkovat. Zásadní otázka spočívá v oblasti skladovatelnosti. Lze elektrickou energii skladovat pro pozdější využití? Lze vůbec se zásobníky elektrické energie počítat jako s plnohodnotnou a rovnocennou alternativou například plné nádrže nafty? Kdyby odpovědi na tyto otázky byly jednoznačné ano, v současné době by situace na našich silnicích a železničních drahách vypadala dočista jinak. Zásadní problém akumulace elektrické energie spočívá v malé objemové a hmotnostní hustotě energie elektrických zásobníků, která je až třicetkrát nižší, než u fosilních paliv. Na velikosti uložené energie závisí hlavně dojezd vozidla, určující jeho využitelnost. I přes tuto omezující vlastnost elektrických akumulátorů energie se v současné době setkáváme s fenoménem zvaným elektro mobilita. Většina populace si pod tímto pojmem představí silniční vozidlo s elektrickou zásuvkou a bez tradičního zvuku spalovacího motoru. Je toto ovšem optimální koncepce vozidla, jenž využívá ke svému pohybu přeměněnou elektrickou energii z akumulátorů?

Z teoretického úvodu vyplývá, že vozidlo napájené akumulovanou elektrickou energií vykazuje výrazné omezení v jeho dojezdu v porovnání s fosilními palivy. Předmětem rozvahy o výběru vhodné aplikace akumulátorů elektrické energie by mělo být ujasnění, co vše je, kromě pohonu, akumulovanou energií na vozidle pokryto a co tedy již zmíněný dojezd ovlivňuje. Tímto lze sestavit několik základních rozhodujících kritérií. Vozidlo s akumulátory by mělo vykazovat nízké jízdní odpory (převážně valivý odpor) a dostatečnou hmotnost na to, aby navýšení jeho hmotnosti instalovanými bateriemi bylo poměrově co nejmenší. Akumulátorové vozidlo by mělo dosahovat vysoké účinnosti pohonného řetězce v součinnosti s optimalizovanými pomocnými spotřebami (například vytápění prostoru pro cestující tepelným čerpadlem). Každý akumulátor vyžaduje pro svoji správnou činnost vhodné nabíječe a s tím spojenou i dostatečnou nabíjecí infrastrukturu. S tímto souvisí možnost definovaného provozu, kde jsou akumulátory navrženy na daný úsek s možností dalšího nabíjení (pokud možno co nejkratšího). Dalším faktorem je využitelnost vozidla, neboť investice jsou nejlépe spláceny jejich využitím.

Výše uvedený výčet hodnotících kritérií specifikuje vlastnosti vozidla, které by mělo v případě akumulátorového napájení velkou šanci na ekonomický a plnohodnotný provoz. Porovná-li se kritéria se současným trendem aplikace akumulátorů, tedy silničními elektro mobily, zjistíme, že tento směr aplikace nemusí přinést kýžené ekonomické úspory. Situace na trhu se silničními akumulátorovými vozidly ukazuje, že oproti individuální osobní dopravě



je ekonomický provoz možný v aplikaci na městskou hromadnou dopravu. Existuje například výhodný provoz elektro busů v historických centrech měst. Oproti tomu oblast kolejové dopravy poskytuje podmínky pro uplatnění elektro mobility naprosto vhodné. Vozidla kolejové dopravy vykazují nízké vozidlové odpory a dostatečnou hmotnost. Instalace akumulátorů by v případě hmotnostních a objemových dispozic vozidla nemela být zásadním problémem. Pohonný řetězec elektrických lokomotiv představuje většinou špičku technologického vývoje v oblasti polovodičové techniky, účinnosti přeměny energie jsou vysoké. Každé kolejové vozidlo je provozováno na definovaných trasách dle přesných jízdních řádů, návrh akumulátorového systému lze tímto koncipovat s ohledem na konkrétní pojížděnou trať. Využitelnost kolejových vozidel též dosahuje vysokého podílu dne.

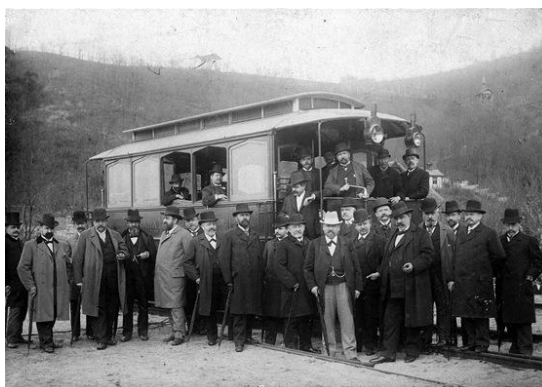
Disertační práce se bude zabývat aplikací akumulátorového systému právě na kolejová vozidla, přičemž se nejprve ohlédne do minulosti, jaké aktivity v oblasti akumulátorově napájených vozidel již kdy byly učiněny. Další partie popíše základní vlastnosti elektro chemických akumulátorů, včetně popisu jejich nejmodernější koncepce, tedy akumulátorů lithiových. Majoritním cílem disertační práce je vytvoření exaktnějšího simulačního modelu akumulátorové baterie, jenž bude sloužit k přesnějším simulacím chování celého akumulátorového vozidla v kontextu s pojížděnou tratí, přičemž celkový simulační model vozidla již na našem pracovišti existuje. K vytvoření exaktnějšího simulačního modelu článku je zapotřebí sestavit přehled vhodných obvodových modelů článků, ze kterých je třeba následně vybrat ten nejvhodnější v souvislosti s dostatečnou přesností a dostupností jeho parametrizace. Na základě vybraného modelu a separaci jeho neznámých parametrů je třeba pak připravit měřicí laboratorní plán, na základě něhož budou vybrané články testovány a získány požadované parametry. Další fáze pak budou obsahovat popis samotného simulačního modelu a následnou validaci výsledků.

## **1 SOUČASNÝ STAV ZKOUMANÉ PROBLEMATIKY**

### **1.1 Historie a současný stav akumulátorových vozidel**

Obecné zdání populace o aplikacích akumulátorů, zvláště pak v dopravních prostředcích, ve většině případů představuje mylnou informaci, že je výsadou pouze současné moderní doby. Přitom z historického hlediska lze považovat pokusy s akumulátorovým napájením kolejových vozidel jako dosti časně a ve většině případů i úspěšné.

Počátky prvních pokusů s akumulátorovým napájením v drážní dopravě se datují od přelomu 19. a 20. století, kdy František Křížík prováděl první zkoušky s akumulátorovým tramvajovým vozem na železniční trati Praha Nusle – Modřany – Zbraslav – Měchenice.



Obrázek 1 - Křižíkova akumulátorová tramvaj[23]

Dalším zástupcem v historickém vývoji byly čtyřnápravové akumulátorové lokomotivy řady E407.0, E417.0 a E416.0 vyrobené firmou ČKD a Škoda, provozované na pražské železnici od roku 1927 do 1960. Akumulátorový systém a trakční pohon byl poplatný době vzniku a provozu – akumulaci energie zabezpečovaly olověné akumulátory a pohon se skládal ze stejnosměrných motorů se ztrátovým odporovým řízením. Při rozjezdu se velká část energie mařila v odpornicích na úkor celkového dojezdu. Nevýhodu ztrátového řízení a regulace odstranila, dosud používaná, posunovací dvounápravová lokomotiva A219 vyrobená též firmou ČKD v 90. letech 20. století. Regulace pohonu byla vyřešena polovodičovými prvky GTO, přičemž toto řešení značně snížilo rozjezdové ztráty a zlepšilo komfort regulace pohonu. O akumulaci energie se též staraly olověné trakční akumulátory. Většina olověných akumulátorových baterií byla sestavena z dílčích článků otevřené koncepce s revizními víčky. Tímto bylo možno elementární články detailně kontrolovat, dolévat destilovanou vodu a v případě poškození vyměnit pouze defektní část baterie. Typickým příkladem využití akumulátorů v osobní kolejové dopravě je motorový vůz s označením ETA 150/515 DB, provozovaný na západoněmeckých drahách v letech 1954 – 1995. Pohon tvořila olověná 440V akumulátorová baterie s kapacitou 846 až 1344Ah a trakční sériové motory s odporovou regulací. Maximální rychlost vozidla dosahovala hodnoty i přes 100km/h! Zde je na několika příkladech možno vidět, že již od počátku 20. století existují snahy o vytvoření kolejového vozidla nezávislé elektrické trakce s plně elektrickým pohonem.

V současné době může být důkazem využitelnosti a postupného vývoje akumulátorových vozidel například oblast průmyslové zóny ostravské aglomerace. Zde jsou využívány třinápravové lokomotivy A314 a čtyřnápravové lokomotivy A415. Pohon tvoří moderní asynchronní motory v součinnosti s IGBT střídači a olověnými akumulátory – moderní pohon s malo-ztrátovou regulací. Otázka nyní nastává v oblasti akumulátoru energie, jenž určuje stěžejní parametry vozidla. Olověný akumulátor představuje tradiční způsob akumulace elektrické energie, nicméně vzniká snaha o inovaci. Moderní koncepci akumulátorového vozu vytvořili v Japonsku. Jedná se o motorový vůz s označením EV-E301. Vozidlo je vybaveno jak sběračem pro provoz v elektrifikovaném úseku trati tak moderními Li akumulátory pro neelektrifikované úseky. Je-li vozidlo ve stanici, probíhá nabíjení z 1,5kV DC troleje. Napětí je sníženo v DC/DC měniči na hodnotu 630V DC a přiváděno na akumulátorovou baterii. Přímo na Li akumulátorovou baterii navazuje třífázový střídač a asynchronní motory. V případě režimu jízdy probíhá odběr energie přímo z akumulátorů, vyjma případu provozu v elektrifikovaném úseku trati, kde je aktivován sběrač a energii vozidlo získává z trakčního vedení za současného dobíjení akumulátorů. Celková energie akumulátorové baterie je 190,1kWh a maximální konstrukční rychlost 100km/h. Vozidlo umožňuje velice účinnou rekuperaci.



Obrázek 2 - Vozidlo EV-E301 [24]

Další současně využívanou aplikací je akumulátorová posunovací lokomotiva pro potřeby vídeňského metra. Jedná se o lokomotivu výrobce Kiepe a Schalker. Lokomotiva využívá pro svůj pohon akumulátory o kapacitě 540Ah a napětí 480V, dále pak IGBT střídače v součinnosti se čtyřmi 130kW asynchronními motory, vždy s využitím jednoho motoru pro jednu nápravu. Brzdění probíhá elektro dynamicky až do úplného zastavení, přičemž pneumatických brzd není většinou zapotřebí. Nabíjet lze vozidlo pomocí střešního kontaktního sběrače či pomocí třetí kolejnice.



Obrázek 3 - Posunovací lokomotiva vídeňského metra[25]



Obrázek 4 - Jednotka Class 379 013 [26]

Novinku poslední doby připravili vývojáři ve firmě Bombardier. Jedná se o vlakovou soupravu s označením CLASS 379 013 Electrostar. Jedná se o koncepci velice podobnou japonským jednotkám EV-E301, se všemi podobnými výhodami – možnost provozu v neelektrifikovaných úsecích a možnost provozu při výpadku napájecí stanice. Zajímavostí uvedené jednotky je použití Li akumulátorových článků o neuvěřitelném počtu 95 000 ks. V případě elektrifikovaného úseku je jednotka napájena napětím 25kV 50Hz, v případě neelektrifikovaného úseku slouží jako zdroj energie akumulátory. Maximální rychlost činí 161 km/h.

Lze shledat jako pozitivní, že zahraniční výrobci usilují o nasazení akumulátorů energie do kolejových vozidel. Jaká je ale situace u nás? Současný trh s kolejovými vozidly je v Čechách omezen převážně na dva nejsilnější výrobce – Škoda a Siemens.

Novinkou výrobce Škoda je zakázková nízkopodlažní tramvaj 28T2 pro turecké město Konya. Jedná se o obdobu výše uvedených vozidel s integrovaným jak akumulátorem, tak sběračem na trolejové vedení. Díky těmto vlastnostem může být tramvaj provozována i v historickém centru města bez potřeby trolejového napájení. Testovací režim probíhal v tramvajové síti města Plzně. Tramvaj 28T2 vychází z modelu napájeného čistě pomocí

sběrače. Maximální rychlost vozidla činí 70km/h, napájecí napětí 750V DC a trvalý výkon 400kW při provozu z trolejového vedení.



Obrázek 5 - Tramvaj Škoda 28T2[27]



Obrázek 6 - Tramvaj Siemens[29]

Současná produkce akumulátorových vozidel firmy Siemens je zaměřena na klíčovou zakázku přibližně dvaceti kusů plně akumulátorových jednotek pro Katar. Jedná se o moderní jednotky s několika vteřinovým nabíjením pouze v zastávkách – na vozidla jsou kladeny vysoké nároky v souvislosti s nabíjecími výkony a tamějšími klimatickými podmínkami.

Dalším typem kolejového vozidla na akumulátorový pohon je tramvaj výrobce Inekon Group. Jednotka se nachází ve fázi finálního dokončení, včetně testování v ostrém provozu ostravské tramvajové sítě. V současné době probíhá příprava na sériovou výrobu sedmi vozů do amerického Seattlu. Výrobu akumulátorového systému zastřešovala renomovaná francouzská firma Saft. Dojezd tramvaje by měl činit 16km a maximální rychlost při provozu z akumulátoru je 32 km/h.

Ve stručném historickém přehledu a náhledu do současné problematiky akumulátorových vozidel je jasné, že akumulátorové napájení nenechalo vývojáře a techniky chladnými již před sto lety. Už tehdy si lidé uvědomovali výhodu elektricky poháněného vozidla bez sběrače či jiného mobilního zdroje energie. Současná doba staví díky bleskově se vyvíjejícím technologiím akumulátorů a řízení pevné základy pro další rozvoj a inovace v tomto odvětví techniky.

## 1.2 Trakční akumulátory a jejich specifikace

### 1.2.1 Akumulátory energie

Akumulátorem energie se rozumí zařízení, které disponuje možností energii daného typu pojmout a následně opět odevzdat. Akumulátorů energie existuje několik základních typů: akumulátory mechanické, termické, chemické či elektrické. Jejich označení plyne právě ze způsobu uložení energie. Mechanické akumulátory využívají k akumulaci například velké setrvačné hmoty rotačních setrvačnicků, termické akumulují teplo, chemické jsou aktivovány například hořením a elektrické využívají elektrické či magnetické pole. Existují akumulátory, které jsou tvořeny kombinací elementárních typů, například elektro-chemické. Jedná se o akumulátor, kde elektrická energie iniciuje vratný chemický proces, díky kterému lze opět elektrickou energii odebrat.

V posledních letech zaznamenala oblast systémů akumulujících energii v kvalitativním měřítku veliký rozvoj. Příčinou vývoje dokonalejších typů akumulátorů energie je zejména

postupný rozvoj bateriově napájených informačních a komunikačních technologií (mobilní telefony, notebooky) a následně elektro mobility, přičemž jako nejperspektivnější se jeví akumulátory elektro-chemické.

Pro účely porovnání využitelnosti v konkrétních aplikacích je nutno akumulátory rozřídít do kategorií dle určitého kritéria. Pro akumulaci energie je důležitá veličina hustota energie. Jedná se o velikost přeměnitelné energie uchované v hmotnostní či objemové jednotce média. Médiiem se rozumí akumulátor energie či palivo, např. akumulátor, uhlí, benzín, nafta apod.

Hmotnostní hustota energie je definována dle vztahu:

$$\omega_{\text{hmotnostní}} = \frac{A_{\text{media}}}{m_{\text{media}}} \quad (1)$$

Kde:

$$\omega_{\text{hmotnostní}} - \text{hmotnostní hustota energie} \left[ \frac{Wh}{kg} \right]$$

$$A_{\text{media}} - \text{využitelná energie media} [Wh]$$

$$m_{\text{media}} - \text{hmotnost media} [kg]$$

Objemová hustota energie je definována dle vztahu:

$$\omega_{\text{objemová}} = \frac{A_{\text{media}}}{V_{\text{media}}} \quad (2)$$

Kde:

$$\omega_{\text{objemová}} - \text{objemová hustota energie} \left[ \frac{Wh}{dm^3} \right]$$

$$A_{\text{media}} - \text{využitelná energie media} [Wh]$$

$$V_{\text{media}} - \text{objem média} [l]$$

Výkonová hustota je definována dle vztahu:

$$\omega_{\text{výkonová}} = \frac{P_{\text{disponibilní}}}{m_{\text{media}}} \quad (3)$$

Kde:

$$\omega_{\text{výkonová}} - \text{výkonová hustota} \left[ \frac{W}{kg} \right]$$

$$P_{\text{disponibilní}} - \text{disponibilní výkon media} [W]$$

$$m_{\text{media}} - \text{hmotnost média} [kg]$$

Ze vztahů lze též definovat, že energetickou hustotu 1 Wh/kg obsahuje medium, které disponuje přeměnitelnou energií 1Wh a celkovou hmotností 1kg. Při návrhu jakéhokoli akumulátorového vozidla patří tento parametr mezi nejdůležitější.

### 1.3 Základní vlastnosti a parametry elektro-chemických akumulátorů

Každá aplikace elektro-chemického akumulátoru (dále jen „akumulátor“ či „aku“) vyžaduje konkrétní nároky, dané druhem provozu. Akumulátor tedy musí být charakterizován množinou parametrů, díky kterým lze rozhodnout o vhodnosti. Níže uvedený výčet představuje základní rodinu stěžejních parametrů.

Každý akumulátor představuje určitou zásobárnu energie s plnou, částečně či plně vyčerpanou energií. Existuje množství parametrů, které jsou ovlivněny právě touto hladinou vyčerpanosti. V kontextu s akumulátory lze hovořit o tzv. hloubce vybití a tzv. stavu nabití. Hloubka vybití v %, často označovaná jako DOD (z anglického Depth Of Discharge) představuje hodnotu energie, která již byla z článku odčerpána. Hodnota 100% DOD odpovídá plně vybitému článku. Stav nabití v %, často označován jako SOC (z anglického State Of Charge) představuje hodnotu energie, která v článku ještě zbývá. Hodnota 100% SOC odpovídá plně nabitému článku. Platí tedy:

$$SOC = 100 - DOD \quad (4)$$

#### 1.3.1 Napětí

Systém, jenž má být akumulátory vybaven a poháněn, vyžaduje vždy specifické napěťové požadavky. Pro dosažení výsledného napětí je nutno elementární články akumulátorů spojovat do sériových, popřípadě pro dosažení vyšších vybíjecích proudů a energie do sérioparalelních kombinací.

Pracovní napětí konkrétního článku zpravidla není konstantní. Okamžitá hodnota svorkového napětí je dána stupněm vybití a velikostí vybíjecího či nabíjecího proudu. Křivka, jenž charakterizuje článek z hlediska napěťového, se nazývá vybíjecí charakteristika. Jedná se o závislost svorkového napětí na hloubce vybití. Podrobnější katalogové listy disponují i vybíjecími charakteristikami při vybraných vybíjecích proudech – obvykle proud blížící se maximální dlouhodobé hodnotě, proud o hodnotě číselné velikosti kapacity článku a proud nízké velikosti v porovnání s předchozími.

Pro výpočty napětí akumulátorových baterií se zpravidla uvažuje tzv. jmenovité napětí článku, které slouží jako příznak nejstabilnějšího napětí článku.

Pro počet sériově řazených akumulátorů pro dosažení požadovaného napětí platí vztah:

$$n = \frac{U_{\text{požadované}}}{U_{\text{článku\_jmen}}} \quad (5)$$

Kde:

$n$  – počet sériově řazených článků [–]

$U_{\text{požadované}}$  – požadované výstupní napětí [V]

### 1.3.2 Energie, Kapacita

Jedním ze základních parametrů každého akumulátoru je velikost energie, kterou dokáže akumulovat. Parametr akumulátoru, vystihující tuto velikost, se nazývá kapacita  $C$ , přičemž nejpoužívanější jednotkou veličiny je Ah - ampérhodina. Hodnota kapacity je závislá na velikosti vybíjecího proudu. Vlivem průchodu proudu vzniká na vnitřním odporu akumulátoru výkonová ztráta, která snižuje celkovou využitelnou kapacitu a článek zahřívá. Kapacita akumulátoru tedy musí být měřena za přesně definovaných podmínek. Dle normy ČSN EN 60254-1 ed.2 patří mezi vybrané podmínky pro měření kapacity olověných akumulátorů konstantní teplota 25°C a velikost vybíjecího proudu, který se číselně rovná dvacetině předpokládané kapacity. V případě nedodržení udaných podmínek je nutno zavést korekční přepočty.

Každý akumulátor má určitou pracovní oblast, ve které lze energii odebírat. Tato hodnota je určena dovoleným napěťovým intervalem. Pro každou technologii akumulátoru je interval rozdílný. Pro olověný akumulátor je tímto intervalem hranice napětí, kdy dochází k projevu plného nabití (plynování článku, hustota elektrolytu 1,28 kg/dm<sup>3</sup>) 2,4V a hranici plného vybití článku 1,5V. Pro běžné lithiové akumulátory tvoří interval krajní hodnoty 2,8V a 4,2V na článek.

Velikost kapacity akumulátoru se zpravidla volí dle předchozích energetických výpočtů. Jedná se o sumaci spotřeb energie pro překonání traťových a vozidlových odporů, energie pro pomocné pohony, vytápění, klimatizaci apod. Hodnota kapacity akumulátoru by měla být volena s dostatečnou rezervou. Jedná se o rezervu provozní, která zmenšuje velikost pravděpodobnosti, že vozidlo nebude disponovat energií pro dojezd do nabíjecí stanice (elektrizovaného úseku) při neuvažovaném režimu jízdy. Kapacitní rezerva má veliký vliv i na životnost akumulátorů a výkonové přetížení.

Energie akumulátoru je dána vzorcem:

$$W = C \cdot U \quad (6)$$

Kde:

$W$  – energie článku [Wh]

$C$  – kapacita článku [Ah]

$U$  – jmenovité napětí článku [V]

### 1.3.3 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor článku, udávaný v katalogových listech výrobců, předpokládá zpravidla obvodovou strukturu článku tvořenou sériovou kombinací ideálního zdroje napětí a průměrného vnitřního odporu  $R_i$ . Na velikosti vnitřního odporu se podílí odpor pólových svorek článku, spoje mezi pólovými svorkami a elektrodami a odpor samotných elektrod. Vnitřní odpor způsobuje pokles svorkového napětí článku s rostoucím odebíraným proudem, zároveň na něm při nabíjení i vybíjení článku dochází k vývinu ztrátového tepla a jeho velikost ovlivňuje účinnost nabíjení a vybíjení článku. Vnitřní odpor článku není konstantní,

jeho velikost závisí na teplotě a na stavu nabití článku. Vnitřní odpory běžných lithiových článků nabývají hodnot řádově jednotek nebo desetin mΩ. Obecně s vyšší hodnotou jmenovité kapacity se snižuje velikost vnitřního odporu. Jak bude uvedeno dále, parametry složitějších obvodových modelů článku výrobci běžně neuvádějí a je nutno je určit měřením.

### 1.3.4 Vybíjecí proud

Z aplikačního hlediska lze vybíjecí proud rozdělit do dvou kategorií – proud trvalý a proud krátkodobý. V případě odběru proudu ze svorek článku vzniká na vnitřním odporu energetický úbytek, který v podobě ztrátového tepla tělo článku ohřívá. Trvalý proud je tedy takový proud, který lze z článku bezpečně odebírat po neomezeně dlouhou dobu při dodržení podmínek daných výrobcem. Limit trvalého proudu je tedy dán maximálním možným oteplením těla článku. Krátkodobý proud na rozdíl od trvalého nelze využívat po neomezeně dlouhou dobu, pouze po stanovený čas daný výrobcem a za současného respektování sil, které během vybíjení v článku mezi elektrodami a propoji v článku vznikají. Výrobce v zásadě definuje i čas nutný k dochlazení. Některé lithiové články obsahují ve vnitřní struktuře i interní nadproudovou ochranu, která má za úkol nepřipustit větší vybíjecí proudy než krátkodobé (např. výrobce Kokam [8]).

### 1.3.5 Výkon

Dalším z důležitých parametrů akumulátoru je výkon, který je schopen v daném časovém úseku odevzdat do zátěže. Výkon  $P$  [W] stejnosměrného proudu je definován jako součin napětí  $U$  [V] akumulátoru a odebíraného proudu  $I$  [A]. Napětí akumulátoru je dáno výrobcem, potažmo technologií výroby akumulátoru. Jediným limitujícím parametrem je odebíraný proud.

Vlivem průchodu proudu akumulátorem vzniká na jeho vnitřním odporu napěťový úbytek, potažmo výkonové ztráty. Pro velikost ztrát platí vztah:

$$P_{ztrátový} = R_i \cdot I^2 \quad (7)$$

Kde:

$P_{ztrátový}$  – ztrátový výkon na vnitřním odporu akumulátoru [W]

$R_i$  – vnitřní odpor akumulátoru [Ω]

$I$  – odebíraný proud [A]

Účinnost akumulátoru při vybíjení je dána následujícím vztahem:

$$\eta = \frac{P_{odebraný}}{P_{odebraný} + P_{ztrátový}} \cdot 100 \quad (8)$$



Kde:

$\eta$  – účinnost vybíjení[%]

$P_{odebraný}$  – výkon odebraný zátěží[W]

$P_{ztrátový}$  – ztrátový výkon akumulátoru[W]

### 1.3.6 Životnost

Při vývoji a realizaci jakéhokoli zařízení je nutno analyzovat, jak dlouho je zařízení schopno za daných podmínek pracovat. V případě akumulátorů energie je životnost závislá jak na zvolené technologii akumulátoru, tak hlavně na režimech provozu a stáří.

Životnost elektrických akumulátorů je omezena těmito parametry:

- Počet vybíjecích cyklů
- Životnost daná stářím akumulátoru
- Snížení životnosti vlivem nesprávného používání

Vybíjecí cyklus lze charakterizovat jako proces, ve kterém dochází k příjmu a výdeji stejné velikosti energie z akumulátoru. Velikost odebrané energie závisí na energetické náročnosti napájeného zařízení. Poměr mezi hodnotou odebrané energie a celkové energie akumulátoru vyjadřuje veličina nazvaná hloubka vybití (DOD<sup>1</sup>), uvádí se v procentech. Například, bude-li z akumulátoru o celkové energii 100kWh odebrána a opět navracena energie o velikosti 5kWh, bude se jednat o cyklus s hloubkou vybití 5%. Ke každému typu akumulátoru by měl výrobce přidat informaci o počtu vybíjecích a nabíjecích cyklů. Pokud není v katalogových listech uvedeno jinak, mělo by se vždy jednat o cykly s hloubkou vybití 100%. Vlivem používání akumulátoru se degradují jeho akumulační schopnosti. Smluvní životnosti je dosaženo, když celková kapacita akumulátoru poklesne o 20%. Nejedná se tedy o životnost konečnou. V případě návrhu systému je nutno s degradací akumulačních schopností počítat. Degradace akumulačních schopností akumulátoru je dána zhoršujícími se vlastnostmi chemických prvků a sloučenin uvnitř článku, tímto probíhají interní chemické procesy s nižší efektivitou a účinností.

Nepříznivý vliv na akumulační schopnosti akumulátoru má i čas. Vlivem stárnutí se degradují vlastnosti chemických prvků a sloučenin uvnitř akumulátoru. Interní chemické procesy probíhají s nižší efektivitou a účinností. Zkracování životnosti vlivem stárnutí patří mezi nevratné děje.

Parametr, který vstupuje do závislosti životnosti akumulátoru, je teplota. Platí přibližně lineární závislost, udávající skutečnost výrazné degradace akumulačních schopností při provozu či skladování akumulátoru v prostorech s vyšší teplotou. Rapidní snížení životnosti

---

<sup>1</sup> DOD vychází z anglické zkratky „depth of discharge“ – hloubka vybití. V literatuře se lze setkat s inverzní veličinou SOC „state of charge“ – stav nabití.

Platí, že  $DOD=100-SOC$  [%,%]

článku se sleduje od teploty od přibližně 40°C, naopak vhodná oblast pro provoz akumulátorů je kolem 20°C. Záleží ovšem na typu a technologii akumulátoru.

Předchozí dvě možnosti demonstrují, jaký přibližný progres má životnost baterie v závislosti na počtech cyklů a době používání. Tyto dvě možnosti nelze eliminovat, neboť by poté akumulátor v systému ztrácel význam. Možnost zvýšení životnosti akumulátoru spočívá v uživatelské znalosti všeobecných požadavků pro provoz dané technologie akumulátoru. V případě plně automatizovaného akumulčního systému se o daný akumulátor stará nadřazený systém, jenž má za úkol krajní a životnost omezující parametry hlídat. Mezi vlivy snižující životnost akumulátoru patří například tyto možnosti:

- Vysoké nabíjecí či vybíjecí proudy
- Extra vysoké či extra nízké provozní teploty
- Vysoký stupeň přebíjení či vysoký stupeň vybití
- Nepřiměřená mechanická manipulace

### 1.3.7 Pracovní teplota

Pracovní teplotu lze chápat jako vymezený teplotní interval, ve kterém lze daný článek provozovat. Provoz za rozličných teplot je svázán i s omezeními, jenž extrémní teploty provází. U většiny článků lze říci, že s klesající teplotou dochází ke zvýšení vnitřního odporu a snížení kapacity. Za nízkých teplot se nedoporučuje skladování a hluboké vybíjení. Se zvyšující se teplotou vnitřní odpor klesá a snižuje se životnost. Teplota má výraznější vliv na chemickou strukturu článku než na ohmický odpor kovových terminálů a vnitřních propojek, proto lze u vlivu teploty na vnitřní odpor sledovat negativní teplotní koeficient. Při instalaci akumulátorového packu do aplikace je nutno předem znát teplotní rozsah okolí právě z důvodu predikce chování packu a možnost ochrany před jeho poškozením je možným predehřevem či klimatizačním zařízením.

## 1.4 Lithiové akumulátory

Akumulátory, jejichž základ tvoří lithium, patří mezi nejmodernější elektrochemické zdroje energie [5]. Jejich výhodou je vyšší hmotností a objemová hustota energie, nevýhodou pak vyšší pořizovací náklady a potřebný nadřazený řídicí management. Výhodná koncepce lithiových akumulátorů vychází z velkého rozdílu elektrických potenciálů uhlíkové záporné a lithné kladné elektrody. Napětí mezi elektrodami dosahuje hodnot okolo 3,5V. V porovnání s olověnými akumulátory s hodnotou napětí 2,1V a například Ni-Mh s 1,2V je hodnota napětí 3,5V opravdu vysoká. Tímto lze skládat akumulátorové baterie o menším počtu článků.

Samozřejmě jsou možné variace lithiových akumulátorů na bázi různých materiálů kladné elektrody. Tímto jsou ovlivněny napěťové, proudové, kapacitní a bezpečnostní vlastnosti. Jistou změnu vlastností lze dosáhnout i formou elektrolytu, který se nachází v Li-ion akumulátoru v tekuté formě. Nejčastěji je založen na bázi lithných solí a agresivních organických rozpouštědlech. V případě vytečení vykazuje elektrolyt korozivní a leptavé účinky, přičemž svým působením může poškodit jak zařízení v těsné blízkosti poškozeného článku, tak poleptat pokožku a sliznice. Z těchto důvodů je nutno Li-ion články opatřit robustním pláštěm minimalizujícím možnosti poškození a vytečení elektrolytu.

Mezi jednotlivými elektrodami článku je umístěn tkaninový separátor, který elektrolyt rovnoměrně rozprostírá po ploše elektrod za současně nízké hodnoty odporu vůči pohybu iontů. Jeho další výhody lze připodobnit k oloveným akumulátorům s elektrolytem nasáklým do separátorů. Jedná se tedy i o zvýšení mechanické odolnosti.

Omezujícím provozním parametrem Li-ion článků je jejich pracovní napěťový interval. Napětí článku by nemělo klesnout pod 2,5V, neboť pod touto hodnotou napětí dochází k silnému narušení vnitřních struktur a tím k masivní ztrátě kapacity. Dále by napětí článku nemělo překročit hodnotu 4,2V. Při překročení dochází k extrémnímu vývinu tepla, článek se nafukuje, plní se hořlavými plyny, přičemž celý cyklus je završen agresivní exotermní reakcí. Z těchto důvodů je u Li článků naprostou nutností instalace nadřazeného dozorčího systému zvaného BMS (battery management system), který hlídá právě uvedené provozní parametry. V případě překročení stanovených tolerancí učiní akční zásah.

Li akumulátory mají oproti Ni-Mh, Ni-Cd akumulátorům vyšší vnitřní odpor, nemohou být dlouhodobě využívány k vysokým proudovým dodávkám. Obecně lze uvést, že standardní Li články by měly bez větších problémů uspokojit proudovou náročnost spotřebiče ve vyšší hodnoty odpovídající velikosti kapacity akumulátoru, tedy 1C. Při požadavku na větší vydaný výkon je nutný teplotní monitoring, hovoří se poté o výkonu s přívlastkem vyjadřujícím, jak dlouho lze stanovený výkon odebírat, například „hodinový výkon“. Li akumulátory nemají paměťový efekt a je možno je nabíjet v jakémkoli stavu nabití. Před prvním nabitím není potřeba formátovacího cyklu, což znamená prvotní úplné vybití a nabití. Oproti ostatním komerčně dostupným článkům Li články v podstatě netrpí samovybitím, daným svodovými proudy mezi elektrodami. Z praktického hlediska lze stanovit velikost samovybití na 5-10% kapacity za měsíc. V případě plně nabité baterie akumulátorů lze systém ponechat teoreticky několik měsíců bez přísunu elektrické energie, není třeba udržovacích nabíječů.

Vnější vlivem, ovlivňující pracovní možnosti, je teplota článku. Vybíjení Li článku může probíhat v rozmezí teplot  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $60^{\circ}\text{C}$ , přičemž horní hranice podstatným dílem určuje životnost. Se zvyšující se pracovní teplotou článku životnost klesá. Teplotní rozsah pro nabíjení je podstatně nižší, nabíjecí cyklus lze zahájit jen tehdy, pokud teplota článku vzroste nad  $0^{\circ}\text{C}$ . V případě nabíjení pod touto hranicí dochází k silné degradaci vnitřních struktur. Aktivní hmota tvořená lithiem se začne rozkládat a usazovat v prostoru elektrolytu a separátoru. Tímto klesá kapacita a v extrémním případě může dojít k vnitřnímu zkratu článku. V případě paralelní kombinace několika článků jeden takto poškozený způsobí poškození i ostatních. Počet vybíjecích cyklů se pohybuje v hodnotách 1000-2500 pro standardní typy článků.

Nabíjení lithiových článků se díky použitým sloučeninám pro výrobu aktivní hmoty stává záležitostí stěžejní. Kvalitou nabíjení lze udržet článek v dobré kondici po celou jeho životnost, v opačném případě lze článek vlivem nesprávného nabíjení po několika cyklech znehodnotit.

Nejdůležitějšími sledovanými veličinami při nabíjení jsou napětí, proud a teplota. Typ vhodného nabíječe musí disponovat nabíjecí charakteristikou typu IU. Nabíjení je nejprve zahájeno konstantním proudem, který by se měl pohybovat v hodnotách okolo poloviny číselné hodnoty kapacity, tzv. nabíjení ve dvouhodinovém režimu. Menší hodnota nabíjecího proudu není na závadu, pouze prodlužuje dobu nabíjení. Vyšší hodnoty zahřívají článek a snižují účinnost nabíjení. Po dosažení maximální hodnoty napětí článku nabíječ přechází do charakteristiky U, tedy konstantního napětí. Na článek je přiloženo jeho maximální napětí, proudový odběr exponenciálně klesá a kapacita se stabilizuje.

## 1.5 Dostupné technologie lithiových akumulátorů

Vývoj Li-ion akumulátorů se v současné době ubírá cestou použití různých materiálů elektrod. Tímto způsobem je možno ovlivnit právě parametry [22].

### 1.5.1 Technologie LCO – Li-ion

Lithiové akumulátory, jejichž kladnou elektrodu tvoří sloučenina  $\text{LiCoO}_2$  (Lithium kobalt oxid) patří v současné době k jednomu z nejrozšířenějších. Jejich uplatnění je napříč světem spotřební elektroniky, zejména však v podobě akumulátorů pro laptopy, kamery a mobilní telefony. Vnitřní struktura se skládá z  $\text{LiCoO}_2$  kladné elektrody a uhlíkové záporné elektrody. U technologie LCO by neměl být překročen vybíjecí proud 1C. Typické provedení představuje pouzdro 18650.

Výhody technologie LCO:

- Vysoká hustota energie (150-200Wh/kg)
- Vysoká hodnota jmenovitého napětí 3,6V

Nevýhody technologie LCO:

- Nízká výkonová hustota
- Nízká bezpečnost
- Nižší životnost (500-1000 cyklů)
- Vysoká cena

Uplatnění LCO akumulátorů pro trakční účely díky výše uvedeným vlastnostem není vhodné. Výhodným parametrem je jistě vysoká hodnota hustoty energie. Pro dosažení vhodné akumulátorové baterie by bylo třeba velké množství článků konfigurovaných v paralelní kombinaci tak, aby baterie pokryla výkonové nároky. Paralelní řazení většího množství článků představuje větší rizika ve spolehlivosti systému – jeden vadný článek zničí všechny ostatní ve stejné paralelní řadě.

### 1.5.2 Technologie NMC Li-ion

Akumulátory technologie NMC patří k velice oblíbeným a hojně užívaným. Kladná elektroda je tvořena sloučeninou  $\text{LiNiMnCoO}_2$ . Články typu NMC mají výhodu v možnosti modifikace buď pro vysoké vybíjecí proudy, pro velkou hustotu energie či dle požadavku zákazníka. Typické vybíjecí proudy dosahují hodnot 2C. Lze však vyrobit i NMC článek s trvalým vybíjecím proudem do cca 5C. Aplikační sférou je ruční nářadí (aku vrtačky

s vysokými krouticími momenty) elektro skútry či elektro kola. Typické pouzdro článku NMC představuje 18650.

Výhody technologie NMC:

- Vysoké hodnoty vybíjecích proudů
- Dobrá bezpečnost
- Dobrá životnost (1000-2000 cyklů)
- Vysoká hustota energie

Nevýhody technologie NMC:

- Vysoká cena
- Nízké hodnoty nabíjecích proudů

### 1.5.3 Technologie LMO Li-ion

Lithiové akumulátory založené na materiálu kladné elektrody  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (Lithium mangan oxid) jsou označovány jako LMO. Vývoj prvních LMO akumulátorů spadá do první poloviny devadesátých let 20. století, kdy se jako výhodná vlastnost nové technologie vyzdvihoval nízký vnitřní odpor. Díky nízké hodnotě vnitřního odporu jsou LMO akumulátory předurčeny k vysokým nabíjecím a vybíjecím proudům, tudíž nalézají uplatnění jak v ručním nářadí, tak v dopravních prostředcích. Jmenovité napětí článku vychází opět z rozdílu elektrických potenciálů elektrod, v případě LMO činí hodnota jmenovitého napětí přibližně 3,8V.

Výhody technologie LMO:

- Vysoké hodnoty nabíjecích proudů
- Vysoké hodnoty vybíjecích proudů
- Přijatelná cena
- Dobrá bezpečnost

Nevýhody technologie LMO:

- Nízká životnost (až 700 cyklů)
- Nižší hustota energie (100-150Wh/kg)

### 1.5.4 Technologie LFP Li-ion

Moderní generaci lithium iontových akumulátorů tvoří články postavené na chemické sloučenině s označením  $\text{LiFe}(\text{Y})\text{PO}_4$  (lithium-železo-(yttrium)-fosfát). Akumulátory nesou toto označení díky použití uvedené sloučeniny pro výrobu kladné elektrody. Hlavní předností

LFP akumulátorů je především zvýšení jejich provozní bezpečnosti. Články lze zatěžovat vyšším proudem bez velikých obav z extrémního vývinu interních plynů a možné exploze. To je dáno silnější chemickou vazbou železa, fosforu a kyslíku než například vazbou mezi kobaltem a kyslíkem v klasických LCO článkách. Díky modifikaci kladné elektrody dochází ke změně jmenovitého napětí elementárního článku. Ze standardních 3,6V je zmenšeno na 3,2V. Provozní napěťový interval tímto dosahuje hodnoty 2,7-3,7V.

Konstrukčním uspořádáním, elektrickými i bezpečnostními parametry jsou LiFePO<sub>4</sub> články předurčeny pro trakční účely.

Výhody technologie LFP:

- Vysoké hodnoty nabíjecích proudů
- Vysoké hodnoty vybíjecích proudů
- Přijatelná cena
- Vysoký stupeň bezpečnosti
- Vysoká životnost

Nevýhody technologie LFP:

- Nízká objemová a hmotnostní hustota energie

### 1.5.5 Technologie NCA – Li-ion

Technologie NCA patří k dalším typům Li-ion akumulátorů. Kladná elektroda je založena na sloučenině LiNiCoAlO<sub>2</sub> (Lithium nikl kobalt hliník oxid). Uplatnění NCA akumulátory nalézají v automobilovém průmyslu jako trakční – například Tesla Motors.

Výhody technologie NCA:

- Vysoké hodnoty nabíjecích proudů
- Vysoké hodnoty vybíjecích proudů
- Vysoká hustota energie (200-260Wh/kg)

Nevýhody technologie NCA:

- Nízká bezpečnost
- Vysoká cena
- Nízká životnost (500 cyklů) – závisí na okolnostech

### 1.5.6 Technologie LTO – Li-ion

Konstrukce akumulátorů LTO se od ostatních liší. Modifikace vnitřní struktury nespočívá ve změně materiálu kladné elektrody, ale záporné. Uhlík je nahrazen sloučeninou  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (Lithium titan oxid), přičemž je tímto ovlivněno i jmenovité napětí článku dosahující hodnoty 2,4V. LTO akumulátory byly primárně vyvinuty pro trakční účely (elektromobily či hybridní vozidla), splňují tedy náročné výkonové podmínky jak při nabíjení, tak vybíjení. Výborné vlastnosti splňuje technologie LTO i v případě samovybíjení. Akumulátory lze tedy skladovat při běžných teplotních podmínkách až deset let. Životnost udaná v počtech cyklů dosahuje dvoj až trojnásobných hodnot oproti ostatním technologiím. Zásadní přednost představují výborné vlastnosti v případě provozu v teplotách pod bodem mrazu. Technologie LTO patří mezi nejmodernější elektrochemické zdroje energie právě pro trakční účely.

Výhody technologie LTO:

- Vysoké hodnoty nabíjecích proudů
- Vysoké hodnoty vybíjecích proudů
- Vysoká životnost
- Vysoká bezpečnost

Nevýhody technologie LTO:

- Nízká objemová a hmotnostní hustota energie
- Vysoká cena

### 1.5.7 Technologie SLPB – Li-pol

Technologie SLPB (Superior Lithium Polymer Battery) je od ostatních výše uvedených odlišná a spadá do sortimentu výrobce Kokam [8], který má výrobu mimo jiné patentovanou. Jedná se o článek typu Li-pol, jehož hlavním rozdílem oproti Li-ion je tuhý elektrolyt. Tato odlišnost přináší výhody v souvislosti s vytečením elektrolytu – v případě článků Li-pol je vytečení elektrolytu z článku nemožné. Tímto jsou kladeny i menší nároky na jakost obalu. Další výhodou je možnost výroby článků v různých tvarech. Základ elektrolytu tvoří lithné soli navázané do polymerického kompozitu. Výhodou technologie SLPB je vysoká hmotnostní a objemová hustota energie, neboť články SLPB vycházejí z technologií NMC, LTO či LFP. Výrobce Kokam ve své řadě SLPB článků nabízí i články hybridní, tedy články kombinující ve své struktuře současně technologii NMC, LFP a LTO. Hybridní články, označované jako „nano“, pak z každé dílčí technologie využívají hlavně přednosti a proto se hodí pro letecký průmysl.

Napěťové parametry jsou podobné technologii Li-ion, jmenovité napětí Li-pol článku činí 3,7V.

Výhody technologie SLPB:

- Vysoké hodnoty vybíjecích proudů

- Vysoká hmotnostní hustota energie
- Vysoká objemová hustota energie
- Nízký vnitřní odpor
- Nejnáročnější aplikace

Nevýhody technologie SLPB:

- Nutnost ohřevu / chlazení článků během provozu
- Nižší hodnoty nabíjecích proudů
- Vysoká cena

## 1.6 Porovnání vybraných akumulátorů

Pro představu o parametrech moderních Li akumulátorů je níže uvedena přehledná tabulka se sumarizovanými parametry. Tabulka naznačuje, že rozdíly mezi jednotlivými technologiemi Li aku jsou značné. Obecně platí, že většinou je jeden výborný parametr vykoupen jiným.

Označení	WB-LYP100Ah	VL41M	SCiB	SLPB120216216
Výrobce	Winston Battery	Saft	Toshiba	Kokam
Technologie	LFP	NCA	LTO	Li-pol
Kapacita [Ah]	100	41	20	53
Energie [Wh]	320	147	46	196,1
Jmenovité napětí [V]	3,2	3,6	2,3	3,7
Hmotnost [kg]	3,5	1,07	0,51	1,16
Objem [l]	2,42	0,51	0,26	0,6
Hmotnostní hustota energie [Wh/kg]	91	136	90	169
Objemová hustota energie [Wh/l]	132	285	177	326
Počet vybíjecích cyklů	>3000 (80% DOD)	>1400 (80%DOD)	4000 (100%DOD)	1200 (100%DOD, 1C)

Tabulka 1 - Porovnání konkrétních akumulátorů různých technologií[6,7,8,9]

## 1.7 Obvodové modely Li-ion akumulátorů

Každý elektrochemický akumulátor elektrické energie je složitou dynamickou soustavou a jakýkoli jeho model vždy představuje zjednodušení fyzikální reality [33]. Principiálně lze rozdělit modely článků akumulátorové baterie do tří skupin: modely vycházející z matematického popisu elektrochemických jevů v článku, modely vycházející z moderních metod popisu dynamických soustav, které jsou laděny soubory učicích dat (typicky modely

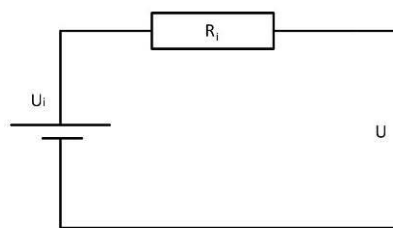


založené na využití neuronových sítí) a modely založené na využití náhradních schémat resp. elektrických obvodů. Výběr konkrétní skupiny modelů je svázán zejména s účelem, pro který má být daný model využíván. V případě potřeby popisu akumulátorových článků ve vazbě na výpočty pohonných řetězců vozidel, jejich simulace nebo při specifikaci energetické a akumulátorové výzbroje pro konkrétní vozidlo jsou pro elektrotechnika nejnázornější obvodové modely akumulátorových článků. V literatuře lze nalézt velké množství obvodových struktur modelů článků, které se třídí podle různých kritérií, například literatura [1], [2], [3]. Obvodové modely lze členit na statické a dynamické, lineární a nelineární, v případě nelineárních modelů lze dále rozlišovat více způsobů, jak je nelinearita v modelu implementována. Obecně platí, že čím složitější model je použit se snahou o co nejvěrnější postihnutí reálných vlastností článku, tím náročnější je jeho parametrizace. Při volbě modelu je tedy vždy potřebné si na začátku stanovit požadavky na přesnost modelu pro daný účel a poté stanovit konkrétní strukturu modelu. Zároveň je nutné mít na zřeteli, že parametrizace modelu může být časově velmi náročný proces vzhledem k závislosti velikosti jednotlivých parametrů nejen na stupni nabití SOC, ale i na stáří a opotřebením akumulátoru. Další komplikací parametrizace modelů je skutečnost, že hodnoty parametrů se mohou výrazně odlišovat nejen v závislosti na technologii a typu článku, ale i v závislosti na konkrétním kusu článku jednoho typu. To jsou důvody k hledání cest k využívání spíše jednodušších modelů s menším počtem parametrů.

Následující partie práce se budou zabývat analýzou obvodových modelů vhodných i pro lithiové články. Představované modely jsou dostačující pro začlenění do simulačních modelů větších pohonných celků vozidel nebo pro účely specifikace akumulátorového systému vozidla.

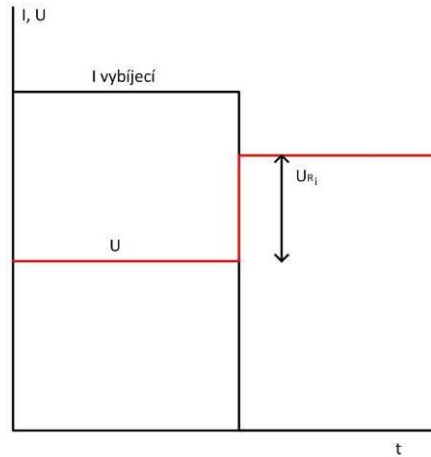
### 1.7.1 $R_i$ model

Typický představitel statického modelu článku je označován jako  $R_i$  model. Struktura je totožná se strukturou zdroje stejnosměrného napětí s vnitřním odporem  $R_i$ .



Obrázek 7 -  $R_i$  model článku

$R_i$  model článku je tvořen sériovou kombinací ideálního zdroje napětí  $U_i$  a vnitřního odporu  $R_i$ . Svorkové napětí  $U$  je zmenšeno o úbytek napětí na vnitřním odporu  $R_i$ . Z takovéto struktury modelu vycházejí zpravidla i katalogové údaje výrobců článků, kde se udává konstantní hodnota vnitřního odporu článku  $R_i$ . Tento model respektuje skutečnost, že svorkové napětí článku  $U$  klesá s rostoucím proudem  $I$  odebíraným z článku – obr. 8.



Obrázek 8 - Napěťová odezva napětí  $R_i$  modelu článku

U reálných lithiových článků nejsou hodnoty  $U_i$  a  $R_i$  konstantní, ale závisí na hloubce vybití DOD, hodnota  $R_i$  i na teplotě. V literatuře lze nalézt různé možnosti adaptace hodnot  $U_i$  a  $R_i$  například podle DOD – lit.[3]:

$$U_i = U_{i0} - A \cdot DOD \quad (8)$$

$$R_i = R_{i0} - B \cdot DOD \quad (9)$$

Ve vztazích (8) a (9) mají symboly následující význam:

$U_{i0}$  – napětí článku naprázdno při plném stavu nabití

$R_{i0}$  – vnitřní odpor článku  $R_i$  ve stavu plného nabití

$A, B$  – parametry, které je na každém článku třeba určit experimentálně

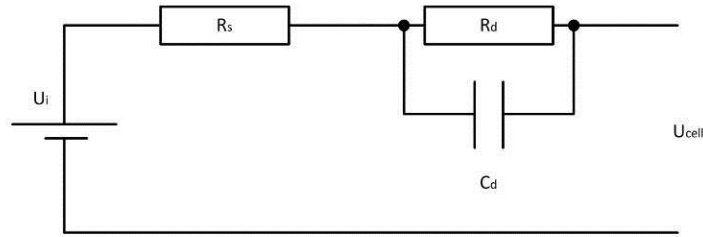
Z aktuálních hodnot napětí  $U_i$  a  $R_i$  a z hodnoty proudu  $I$ , který je článkem odebírán, lze určit aktuální svorkové napětí článku  $U$  podle vztahu:

$$U = U_i - R_i \cdot I \quad (10)$$

$R_i$  model článku je třeba nutno vnímat jako model statický, který nezohledňuje dynamické jevy spojené zejména se změnami okamžité hodnoty odebíraného proudu  $I$ .

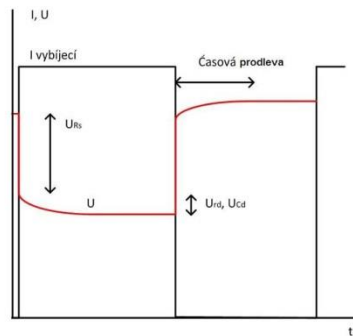
### 1.7.2 Theveninův model

Theveninův model článku (obr. 9), jak je označován podle lit. [2], je model zohledňující dynamické jevy na článku spojené s průběhy okamžité hodnoty svorkového napětí v návaznosti na změny odebíraného proudu. Dynamické vlastnosti zohledňují i další modely článků, které zde budou dále prezentovány.



Obrázek 9 - Theveninův model článku

Typickou vlastností lithiových článků je pozvolná odezva svorkového napětí po změně proudu, ať již jde o zvýšení či snížení proudu. Toto zpoždění je dáno polarizací článku. Odezvy svorkového napětí článku po změně proudu jsou principiálně znázorněny na obr. 10.



Obrázek 10 - Napěťová odezva Theveninova modelu článku

Theveninův model článku podle obr. 9 respektuje jevy znázorněné na obr. 10 řazením paralelní kombinace odporu  $R_d$  a kapacity  $C_d$  do série s odporem  $R_s$ . Vnitřní napětí článku  $U_i$  jsou u  $R_i$  modelu a Theveninova modelu totožná. Vztahy mezi  $R_i$  modelem a Theveninovým modelem jsou zřejmé: v ustáleném stavu přechází Theveninův model do podoby  $R_i$  modelu a mezi odpory obou modelů platí vztah:

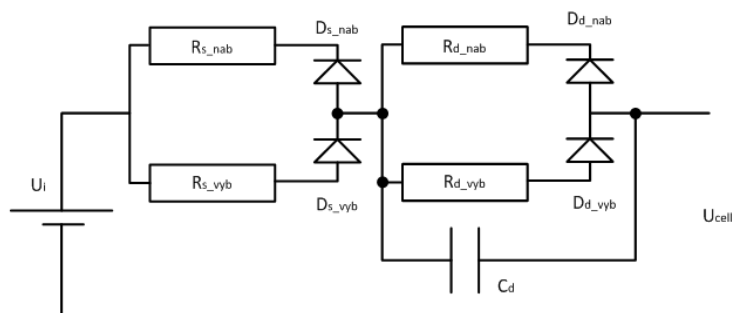
$$R_i = R_s + R_d \quad (11)$$

V dynamických stavech způsobuje pozvolnou změnu napětí na svorkách článku náhradní kapacita  $C_d$ . Značení úbytků napětí na obr. 4 koresponduje se značením obvodových prvků na obr. 3. V Theveninově modelu jsou mnohdy uvažovány konstantní hodnoty parametrů obvodu, případně se hodnota  $U_i$  adaptuje podle DOD. Reálně se ale hodnoty  $R$  a  $C$  také mění s DOD a také s teplotou. Některé modifikované Theveninovy modely respektují rozdílnou hodnotu odporu  $R_s$  při nabíjení a vybíjení.

### 1.7.3 Modifikovaný Theveninův model

Modifikovaný Theveninův model představuje zpřesněnou variantu předchozího případu [3]. Jedná se o představitele nelineárního modelu, kde obvodové parametry nezávisí pouze na hloubce vybití, ale i na směru procházejícího proudu. Při nabíjení prochází proud přes diodu  $D_{d\_nab}$ ,  $R_{d\_nab}$ ,  $D_{s\_nab}$  a  $R_{s\_nab}$ . Při vybíjení pak obvodovými prvky  $R_{s\_vyb}$ ,  $D_{s\_vyb}$ ,

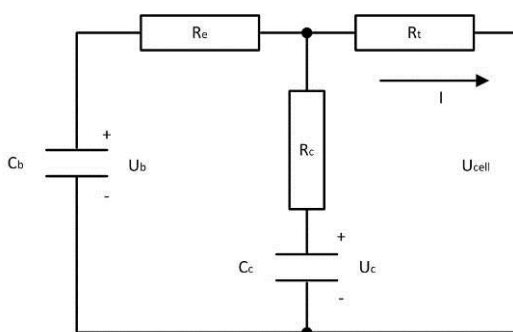
$R_{d\_vyb}$  a  $D_{d\_vyb}$ . Článek tedy vykazuje jiný charakter při vybíjení a jiný při nabíjení, což je nutno respektovat při jeho parametrizaci.



Obrázek 11 - Modifikovaný Theveninův model

### 1.7.4 RC model

Schematická struktura RC modelu článku je uvedena na následujícím obrázku.

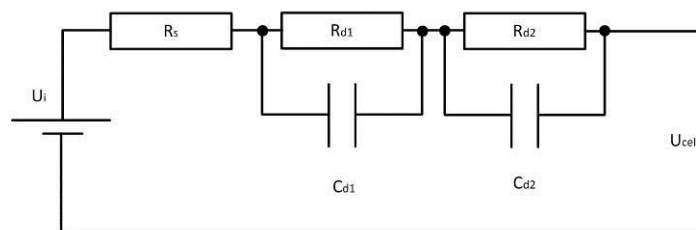


Obrázek 12 - RC model článku

Model byl vyvinut firmou Saft [11]. Náhradní kondenzátor  $C_C$  respektuje malou kapacitu vnějších vrstev elektrod, kondenzátor  $C_b$  modeluje vlastní elektrochemickou kapacitu článku, odpor  $R_t$  modeluje odpor pólových svorek a vnitřních spojů v článku, odpor  $R_e$  modeluje především vnitřní odpor elektrod a odpor  $R_C$  je sériovým odporem kapacity  $C_C$ .

### 1.7.5 Theveninův DP model

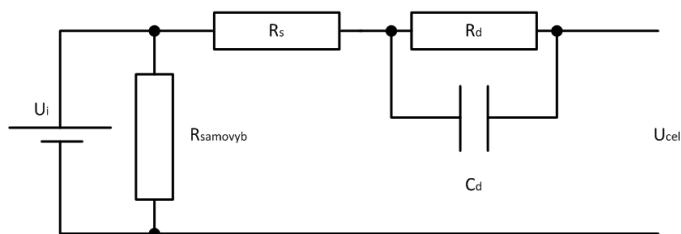
Tento model vychází ze základní struktury Theveninova modelu a zdvojuje v sérii paralelní kombinaci  $R$  a  $C$ , čímž je přesněji modelován dvojí charakter polarizace v článku – polarizace vnější – koncentrační a polarizace elektrochemická, lit. [2]. V literatuře [3] je prezentován postup parametrizace tohoto modelu na základě elektrochemické spektrální analýzy článku, kdy jsou experimentálně určeny impedance prvků obvodu pro určené frekvence.



Obrázek 13 - Theveninův DP model

### 1.7.6 Modely zohledňující samovybíjení

Každý elektrochemický článek vykazuje vlastnost, kterou je nutno uvažovat zejména v případě dlouhodobějšího skladování či provozu s nízkou frekvencí využití, a to samovybíjení [3]. Samovybíjení představuje proces, při kterém se článek samovolně vybíjí bez ohledu na to, zda k němu je či není připojena externí zátěž. Jev je způsoben převážně nezanedbatelným izolačním odporem mezi jednotlivými elektrodami a zpětnými elektrochemickými reakcemi, které mezi elektrodami probíhají. Velikost samovybíjení ovlivňuje teplota, stáří a hloubka vybití článku. U hermeticky uzavřených článků (např. tradiční zalité Pb články) samovybíjení vysokou měrou ovlivňuje i podíl nečistot v elektrolytu, které se mohou do elektrolytu velice snadno dostat například při preventivní kontrole jeho hladiny. Lithiové články mají výhodu hermeticky uzavřené koncepce a vnitřní struktury uzpůsobené tak, že samovybíjení představuje jednotky procent kapacity za měsíc. Vzhledem k uvedeným skutečnostem je nutno vzít z provozního hlediska u Li článků v patrnost zvýšené samovybíjení článků vlivem trvalého napojení balančních jednotek, i když se v době nečinnosti systému nacházejí v režimu standby (standby odběr řídicích IC, parazitní závěrné proudy výkonových tranzistorů, svody dalších součástek, apod). Pro simulace trakčních vozidel, kde je počítáno s každodenním nabíjením a využitím lithiových článků, vliv samovybíjení, i se zohledněním klidové spotřeby nadřazených systémů, není tak podstatný. Pro případ zpřesnění simulačního modelu daného článku lze využít paralelního rezistoru ke zdroji vnitřního napětí, jako je tomu například v níže uvedeném obrázku.



Obrázek 14 - Theveninův model zohledňující samovybíjení

## 1.8 Možnosti simulace akumulátorového systému

Elektrochemické akumulátory elektrické energie, včetně lithiových, jsou komplikované nelineární soustavy, jejichž vlastnosti, zejména kapacita, svorkové napětí a vnitřní odpor, jsou ovlivněny mnoha faktory. Hlavními faktory ovlivňujícími jejich parametry jsou hloubka vybití DOD, teplota, stáří, vybíjecí proud, ale i historie podmínek, ve kterých byl akumulátor provozován. Rozdíly mezi vlastnostmi lze nalézt i u jednotlivých kusů téhož typu. V této situaci je každý model akumulátoru vždy jen lepším či horším přiblížením se fyzikální realitě.

Ve výše uvedených odstavcích byly přiblíženy konkrétní typy modelů včetně popisu toho, co zanedbávají a co naopak uvažují. Vhodnost konkrétního modelu je proto úzce svázána s účelem jeho použití a nároky na výslednou přesnost.

Prvním krokem v etapě simulace akumulátorového systému představuje sumarizace požadavků, jenž mají být při provozu respektovány. Rozdíly lze spatřit například u akumulátorového systému s inteligentní regulací teploty klimatizací či topením, kdy je teplota článků udržována v určitém omezeném teplotním intervalu, v porovnání s akupackem vystaveným okolní teplotě bez regulace. Odlišné požadavky lze najít i u akumulátorů hluboko cyklových a u akumulátorů, které se periodicky vybíjejí pouze o malé DOD.

Oblast nástrojů pro výslednou simulaci zahrnuje produkt firmy Mathworks, tedy Matlab a jeho nadstavbou pro možnost grafického programování Simulink.

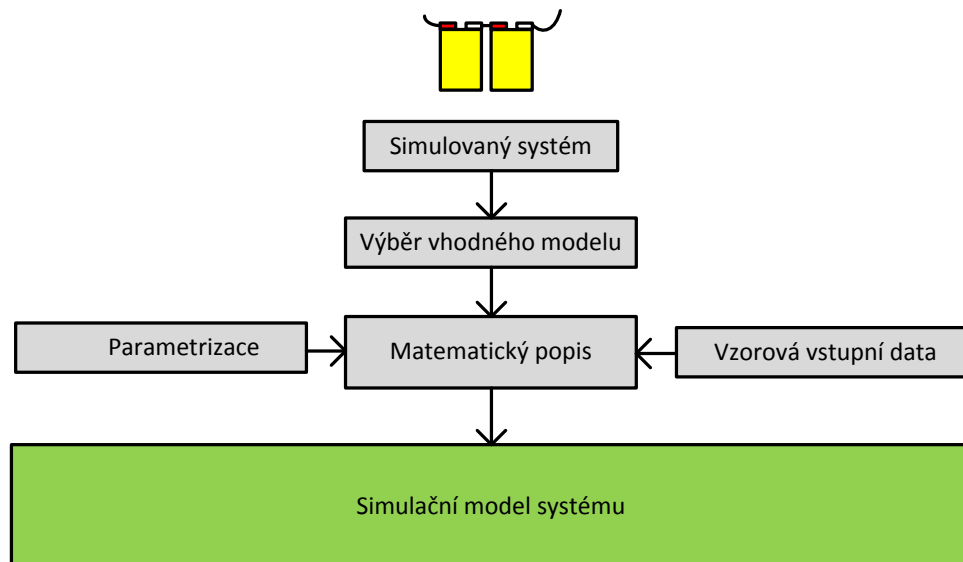
### 1.8.1 Matlab

Matlab představuje klíčového představitele nástroje pro řešení problémů v matematické rovině, grafice, zpracování dat, apod. Jeho název jednoznačně vystihuje zaměření systému, tedy „matrix laboratory“ [30]. Uvedení na trh se datuje od roku 1984, kdy americká firma The MathWorks představila novinku, jež významným dílem přispěla ke zkvalitnění a urychlení většiny dosavadních výpočtů.

Efektivní využitelnost lze nalézt v těchto směrech:

- výpočty matematického charakteru
- modelování
- analýza a vizualizace dat
- zpracování dat
- algoritmizace
- návrhy řídicích systémů

Z výše uvedeného vyplývá, že Matlab umožňuje efektivní řešení i pro modelování akumulátorových systémů. Princip činnosti je založen na matematickém popisu problematiky, kde má uživatel tak široké možnosti, jak jen jeho aplikace potřebuje a jak je možné ji matematicky popsat. Návrh obecného systému či konkrétního akumulátorového lze tedy shrnout do několika bloků.

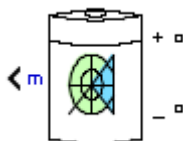


Obrázek 15 - Návrh simulačního modelu v prostředí Matlab

## 1.8.2 Matlab – Simulink

Prostředí Matlab disponuje možností využití nadstavbového systému Simulink. Jedná se o nadstavbu, jež je předurčena k simulacím za pomoci grafického programování. Na rozdíl od Matlabu, který pracuje na principu řádkových příkazů, Simulink pracuje s bloky [30]. Každý blok pak v sobě ukrývá matematický popis dané části celkového systému a na své okolí pak působí jako black box se vstupními a výstupními terminály. Jednotlivé bloky je možno spojovat dle potřeby a tímto skládat rozsáhlejší sestavy.

Výhodou Simulinku oproti Matlabu je hlavně v přehlednosti. Jednotlivé bloky lze vrstvit do subsystémů, kde jeden blok může obsahovat další skupinu navzájem propojených bloků. Bloky lze editovat či využít již hotových bloků z knihovny softwaru. Jedním z bloků knihovny je i blok Battery [31, 34].

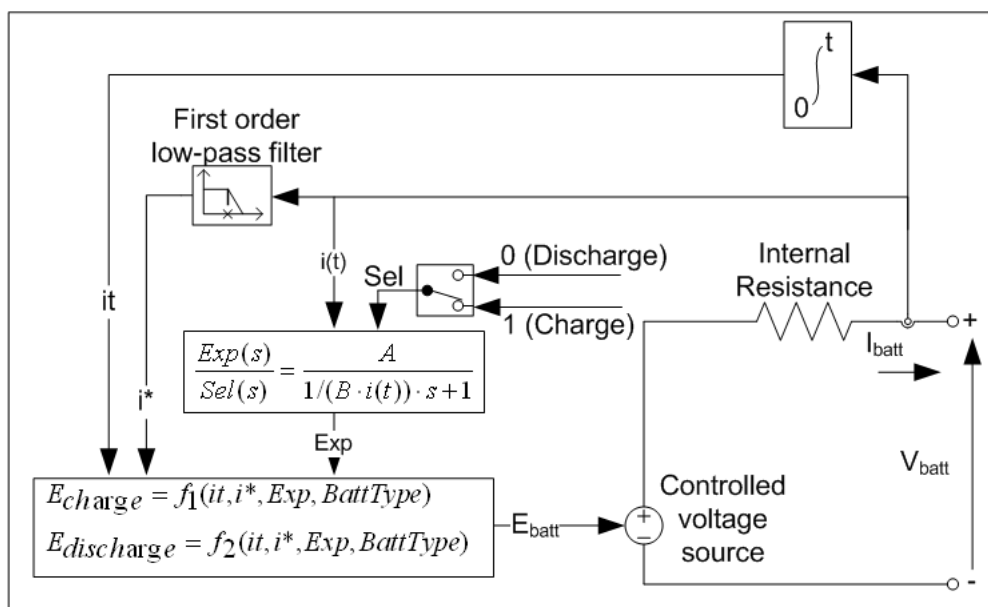


### Popis bloku Battery:

Blok s označením Battery se skládá z několika základních částí:

- Regulovatelný zdroj napětí (Controlled voltage source)
- Vnitřní odpor (Internal resistance)
- Integrátor
- Přepínač nabíjení / vybití (Sel)
- Dolní propust prvního řádu (First order low-pass filter)

- Matematický model



Obrázek 16 - Vnitřní struktura bloku Battery [34]

Blok je navrhnut tak, aby bylo možno simulovat základní druhy článků: olověné, lithiové, NiCd a NiMh. Pro každou z uvedených technologií jsou použity jiné matematické modely pro co nejpřesnější vystihnoutí konkrétního chování. Pro technologii lithiových článků model vychází z níže uvedených matematických interpretací.

Režim nabíjení:

$$E_{charge} = f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (9)$$

Režim vybíjení:

$$E_{discharge} = f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (10)$$

Kde:

$E_{charge}$  – napětí článku závislé na vybíjecím proudu [V]

$E_0$  – napětí článku na prázdko [V]

$K$  – polarizační konstanta [ $Ah^{-1}$ ] či polarizační odpor [Ohm]

$Q$  – maximální kapacita článku [Ah]

$i$  – odebíraný proud [A]

$i^*$  - filtrovaný vybíjecí proud [A]

$t$  – čas [h]



$it$  – odebraná kapacita z článku za dobu  $t$  při proudu  $i$  [Ah]

$A$  – exponenciální napětí [V]

$B$  – Exponenciální kapacita [ $\text{Ah}^{-1}$ ]

Z rovnic je patrné, že vnitřní napětí článku  $E_{\text{charge}}$  či  $E_{\text{discharge}}$  závisí na vybíjecím proudu  $i$ , na filtrovaném vybíjecím proudu  $i^*$  a stupni vybití. V rovnicích jsou zohledněny dva druhy polarizace a změna charakteristiky pro nabíjení a vybití. Z tohoto vyplývá, že model vykazuje charakter kombinace Theveninova DP modelu a modifikovaného Theveninova modelu. Samovybití není uvažováno. Teplotní závislosti výše uvedené rovnice v základní formě neuvažují, přičemž lze provést modifikaci.

Matematické vyjádření teplotně závislého modelu Li-ion článku:

Režim nabíjení:

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (11)$$

$$V_{\text{batt}}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i$$

Režim vybití:

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it + 0.1 \cdot Q(T_a)} \cdot i^* - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (12)$$

$$V_{\text{batt}}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i$$

Kde:

$E_0(T)$  – teplotně závislé napětí článku na prázdko [V]

$K(T)$  – teplotně závislá polarizační konstanta [ $\text{Ah}^{-1}$ ] či polarizační odpor [Ohm]

$Q(T_a)$  – teplotně závislá maximální kapacita článku [Ah]

$i$  – odebíraný proud [A]

$i^*$  - filtrovaný vybíjecí proud [A]

$t$  – čas [h]

$it$  – odebraná kapacita z článku za dobu  $t$  při proudu  $i$  [Ah]

$A$  – exponenciální napětí [V]

$B$  – Exponenciální kapacita [ $\text{Ah}^{-1}$ ]

$C$  – strmota vybíjecí charakteristiky [V/Ah] – pro li-ion akumulátory se volí z důvodu tvrdé vybíjecí charakteristiky 0

$T$  – teplota článku [K]

$T_a$  – teplota okolí [K]

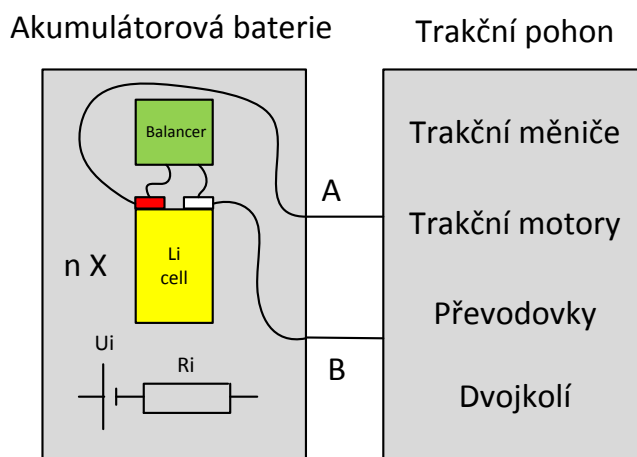
## 1.9 Návrh metodiky pro optimalizaci akumulátorového systému vozidla

Návrh a optimalizace akumulátorového systému představuje jednu ze stěžejních částí návrhu vozidla, jeho parametry ovlivňují celkovou využitelnost vozidla, životnost, bezpečnost a náklady na provoz [32]. Akumulátor energie zabezpečuje dvě hlavní provozní veličiny – energii na překonání neelektrifikovaného úseku a dodávaný výkon. Jedná se o omezující parametry a právě tyto určují, zda vozidlo bude možno provozovat na určeném úseku tratě.

Vstupní veličiny pro návrh akumulátorového systému:

- **Maximální energetická náročnost nejkritičtějšího traťového úseku** – Jedná se o výsledek předchozí simulace vozidla na konkrétní trati
- **Maximální výkonová náročnost (nabíjecí či vybíjecí výkon)** – Jedná se též o výsledek předchozí simulace vozidla na konkrétní trati
- **Napětí stejnosměrného meziobvodu** – Pevně daný parametr, jenž je charakterizován použitými komponentami elektrické výzbroje.
- **Bezpečnost** – Každá technologie Li akumulátorů má rozdílné bezpečnostní vlastnosti. Typický rozdíl činí technologie LFP a Li-pol, LFP představuje velice vhodnou variantu pro aplikace bez hmotnostních omezení a s vysokou mírou bezpečnosti. Naproti tomu technologie Li-pol vyžaduje extrémně přesný nabíjecí management, přičemž benefit činí vysoká hustota energie.
- **Životnost** – Opět každá technologie akumulátorů dosahuje jiných životnostních trendů. Vždy závisí na konkrétní aplikaci, zda volit akumulátorovou baterii na hranici svých možností se sníženou životností, či akumulátorovou baterii předdimenzovat a získat životnost například několikanásobnou.
- **Hmotnost** – Rozhodující parametr při výpočtu konstrukce nápravového zatížení drážního vozidla.

Pro ucelenou představu je nutno vymezit oblast řešené problematiky. Akumulátorový systém sestává z určitého počtu elementárních článků, které lze z elektrického hlediska charakterizovat jmenovitým napětím, vnitřním odporem (a dalšími prvky dle zvoleného modelu článku), kapacitou a dovoleným trvalým a krátkodobým vybíjecím/nabíjecím proudem. Každý článek je pro potřeby monitoringu opatřen balancérem, tedy zařízením, jenž vyrovnává napětí článků akumulátorové baterie a měří jeho provozní parametry. Soustava balancérů ve spojitosti s centrální jednotkou a snímači elektrických a neelektrických veličin tvoří celkový systém BMS (battery management system). Akumulátorová baterie je tedy od ostatního zařízení oddělena svorkami A a B, které též představují odběrné místo energie. Trakční pohon představuje spotřebič.



Obrázek 17 - Akumulátorový systém vozidla v součinnosti se spotřebičem

- **Výpočet potřebného proudu na svorkách A, B**

Pro výpočet odebíraného proudu je nutno znát jmenovité napětí akumulátorové baterie. Pro návrh akumulátorové baterie je vhodné koncipovat uspořádání tak, aby odebírané proudy byly co nejmenší. Tohoto se dosáhne volbou nejvyššího možného dovoleného napětí. Pro počet článků akumulátorové baterie potom platí vztah:

$$n_{\text{článků}} = \frac{U_{\text{akubaterie\_jmen}}}{U_{\text{aku\_jmen}}} \quad (13)$$

Kde  $U_{\text{akubaterie\_jmen}}$  vyjadřuje jmenovité napětí na vstupu měničů [V] a  $U_{\text{aku\_jmen}}$  poté jmenovité napětí elementárního článku při provozu [V]. Velikost odebíraného proudu při nejvyšším výkonovém výdeji a se zanedbáním vnitřního odporu lze spočítat jako:

$$I_{\text{trakční}} = \frac{P_{A,B}}{U_{\text{akubaterie\_jmen}}} \quad (14)$$

- **Výpočet potřebné kapacity akumulátoru**

Každý akumulátor mimo svého elektromotorického napětí, které je možno na akumulátoru změřit ve stavu bez zatížení, obsahuje i přídavný sériový odpor, takzvaný vnitřní odpor  $R_i$  (jehož interpretace a vliv závisí na typu obvodového modelu článku). Při zatížení na tomto odporu vzniká energetická ztráta, která snižuje celkovou energetickou vydatnost akumulátoru. Dle normy ČSN EN 62660-1 je jmenovitá kapacita akumulátoru měřena proudem o velikosti 0,3C, přičemž i při tomto proudu vznikají energetické ztráty právě na vnitřním odporu. Kapacita uvedená výrobcem by měla být uvedena jako hodnota kapacity akumulátoru, kterou lze odebrat na jejích svorkách právě při konkrétně definovaném vybíjecím proudu.

Na základě výše uvedeného můžeme rozdělit kapacitu akumulátoru do dvou kategorií. Kapacitu vnější jmenovitou, která vypovídá o reálné využitelné energii akumulátoru, a kapacitu vnitřní, která je při výdeji snížena o ztrátu na vnitřním odporu.

Velikost potřebné vnitřní kapacity akumulátoru lze spočítat dle níže uvedeného vztahu:

$$C_{akubat\_jmen} = \frac{A_{potřebná}}{U_{akubaterie\_jmen} \cdot \eta_{vyb}} \quad (15)$$

Kde  $C_{akubat\_jmen}$  figuruje jako celková potřebná vnitřní kapacita akumulátorové baterie [Ah],  $A_{potřebná}$  jako celková potřebná energie pro překonání všech traťových a vozidlových odporů [Wh] a  $\eta_{vyb}$  pak účinnost vybíjení.

- **Stanovení kapacity akumulátorové baterie**

V případě použití reálné akumulátorové baterie o stejné jmenovité kapacitě, jako vypočtené, by docházelo ke dvěma negativním jevům. Baterie by byla nadměrně vybíjena, hloubka vybití (DOD) by při každém cyklu dosahovala hodnot k 100%, v případě degradace akumulčních schopností by s největší pravděpodobností nebylo možno dosahovat vysokých trakčních výkonů za současného zachování délky dojezdu. Druhým jevem je zatížení vysokým trakčním proudem a nadměrný ohřev akumulátoru spojený s urychleným procesem stárnutí.

Akumulátorovou baterii je nutno dostatečným způsobem předdimenzovat. Běžný stupeň dimenzování dosahuje hodnot 120%.

Pro minimální vnitřní kapacitu reálné akumulátorové baterie platí:

$$C_{vysledná} = C_{akubat\_jmen} \cdot 1,2 \quad (16)$$

- **Výkonové / proudové dimenzování konkrétní akumulátorové baterie**

Výsledná hodnota kapacity akumulátorové baterie tvoří jedno z provozních kritérií. Druhým omezením je trvalý disponibilní proud (potažmo výkon) akumulátorové baterie. Každý akumulátor by měl ve svých katalogových listech obsahovat parametry definující proudové poměry. Stěžejní parametr je označován jako maximální dlouhodobý odebíraný proud, špičkový odebíraný proud je většinou doplněn o čas jeho odběru.

Při znalosti kapacity akumulátorové baterie je možno tuto podmínku ověřit. Například, pro technologii LFP činí velikost trvalého vybíjecího proudu až 3C (tedy trojnásobek hodnoty jmenovité kapacity v Ah). Pokud není splněna podmínka proudového odběru, kapacita baterie musí být dále navýšena.

Extrémní situace nastávají v případě sice krátkých, ale výkonově náročných tratí. Zde musí být baterie dimenzována majoritně v ohledu na požadovaný výkon – akumulátorový systém poté dosahuje sekundárně vysokých hodnot kapacity, která nikdy nebude využita z hlediska velikosti odebírané energie.

V úvodních partiích disertační práce figurovala jako kvalitativní parametr životnost. Jak již bylo zmíněno, životnost zásadním způsobem ovlivňuje jak hloubka periodického vybíjení DOD, tak zvýšená provozní teplota. Při návrhu systému je nutno přizpůsobit konkrétní řešení tak, by akumulátorová baterie nebyla přetěžována. Vysoké proudové odběry způsobují zvýšení teploty článku a následnou degradaci akumulčních schopností, hluboké vybíjení má tentýž efekt. Životnost článku je ovlivněna též pracovní teplotou. Ideální pracovní podmínky lze charakterizovat teplotou od přibližně 15°C do přibližně 30°C. V případě provozu

akumulátorové baterie v nízkých teplotách dochází k majoritnímu vzrůstu vnitřního odporu, což se projeví ve snížené účinnosti nabíjení a vybíjení. Krajní případ představuje nabíjení pod bodem mrazu, kdy dochází k razantní degradaci akumuláčnických schopností. V případě provozu akumulátorové baterie ve vyšších teplotách též dochází k urychlenému procesu stárnutí.

Z hlediska provozního a životnostního je nutno každý akumulátorový systém, jenž je vystaven vlivu měnících se teplot (aplikace v exteriérech), vybavit nadřazeným systémem termálního managementu. V praxi toto znamená integrovat do akumulátorového systému možnost dodatečného chlazení a temperování.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Sumarizace zamýšlených cílů disertační práce:

- Rešerše vlastností Li trakčních akumulátorů
- Definování vhodné struktury a parametrů simulačního modelu akumulátoru, který lze začlenit do simulačního modelu pohonného řetězce kolejového vozidla
- Realizace akumulátorového systému a BMS na experimentálním kolejovém vozidle
- Měření vlivu charakteru jízdy vozidla na účinnost vybíjení u různých akumulátorových systémů
- Parametrizace simulačního modelu na základě testování různých typů Li akumulátorů v laboratoři a na experimentálním kolejovém vozidle s ohledem na využití v celkovém modelu dvouzdrojového vozidla
- Návrh metodiky pro optimalizaci akumulátorového systému kolejového vozidla

## 3 PŘEHLED ZVOLENÝCH METOD ZPRACOVÁNÍ

### 3.1 Definování vhodné struktury a parametrů modelu článku

Kapitola 1.7 popisuje nejčastěji využívané modely elektrochemických článků. Každý z nich disponuje určitou dávkou přesnosti a určitou dávkou složitosti, přičemž mezi těmito vlastnostmi nemusí být nutně přímá úměra. Literatura [2] uvádí srovnání výpočetní přesnosti průběhu svorkového napětí akumulátorové baterie Li-pol při zatěžovacím cyklu při použití modelů  $R_i$ , RC, Theveninova a Theveninova DP. Ukazuje se, že v případě této baterie je dosahováno nejmenší výpočetní chyby při použití Theveninova DP modelu - pod půl procenta, při použití Theveninova modelu je dosaženo chyby přibližně půl procenta, při použití  $R_i$  a RC modelu dosahuje chyba výpočtu svorkového napětí přes dvě procenta. Je tedy zřejmé, že použití složitějšího modelu s větším počtem parametrů nemusí nutně vést k přesnějším výsledkům.

Literatura [32] podrobně popisuje konkrétní záměr sestavení metodiky pro parametrizaci simulačního modelu akumulátorového systému, a sice simulace dvou zdrojového kolejového vozidla. Cílem je doplnit stávající model celého vozidla právě o zpřesněnou variantu modelu akumulátorové baterie. Do současnosti veškeré simulace probíhaly za využití jednoduchého  $R_i$  modelu, kde nejsou žádnou měrou zohledněny dynamické děje v případě nekonstantního proudového odběru. Výsledky tímto mohou být značně nepřesné a mohou zkreslovat využitelnost vozidla na reálné trati.

Před samotným návrhem metodiky pro parametrizaci modelu a následnou simulaci je nutno učinit kvalifikované rozhodnutí, který model a které simulační prostřední zvolit. Nabízela by se varianta poskytnout simulačnímu modelu celého vozidla model akumulátoru s nejvyšší přesností – tedy model s nejmenšími odchylkami svorkového napětí od reálných hodnot. Druhou stránkou věci je již zmiňovaná složitost obvodové struktury, která jde ruku v ruce se složitostí identifikace jednotlivých parametrů. Simulační prostředí Simulink nabízí hotové řešení modelu Li-ion akumulátoru charakteru Theveninova DP a modifikovaného Theveninova modelu. Nastínění problematiky parametrizace je uveden v literatuře [31, 34], kde je patrné, že parametrizace nerespektuje například různé technologie Li-ion či Li-pol článků, stejně tak i závislost velikosti vnitřního odporu na hloubce vybití.

Z výše uvedených faktů postupnou iterací vychází jako vhodná volba univerzální prostředí Matlab s využitím takového modelu, který dosahuje vyšší přesnosti v porovnání s  $R_i$  modelem, je možné ho popsat jednodušším matematickým aparátem a hlavně naparametrovat na základě dostupných měřicích metod aplikovatelných do již zavedených laboratoří. Prostředí Matlab nahrává i fakt, že celý model vozidla funguje na této platformě a začlenění do stávající struktury bude efektivnější.

Z hlediska kompromisu mezi výpočetní přesností modelu a jeho složitostí vychází nejvýhodnější použití Theveninova modelu.

### 3.2 Experimentální laboratorní testy

Katalogové údaje konkrétního akumulátoru jednoznačně definují jeho vlastnosti za určitých podmínek. Tyto podmínky (pokud jsou vůbec uvedeny) většinou představují pouze omezenou množinu stavů, které mohou na vozidle během provozu nastat. Proto je nutno ověřit či dodatečně zjistit závislosti, které katalogové listy neobsahují. Laboratorní testy slouží ke zpřesnění či ověření nad rámec katalogových údajů a pro následnou parametrizaci vybraného modelu článku.

Theveninův model obsahuje čtyři základní neznámé:

- vnitřní elektromotorické napětí  $U_i$
- sériový odpor  $R_s$
- dynamický odpor  $R_d$
- dynamickou kapacitu  $C_d$

Běžné katalogové listy disponují kvalitativními parametry: kapacita, jmenovité napětí, pracovní napěťový rozsah, maximální dlouhodobý nabíjecí a vybíjecí proud, přibližná životnost, vnitřní odpor, vybíjecí charakteristiky pro jeden či více vybíjecích proudů,

mechanické rozměry a hmotnost. Každý výrobce má ve svých pravomocech, jak přesné a obsáhlé katalogové listy budou. Nicméně, katalogový list přesto dává uživateli velice přesnou informaci o tom, jestli je ten daný model článku pro danou aplikaci vhodný. Z výše vyčtených běžných katalogových údajů je patrné, že není zvykem uvádět rozšířený výčet pro možnost parametrizace některého z modelů, jehož složitost převyšuje model Ri.




Laboratorní měření, má-li přinést kýžené zpřesnění, musí být cílené. Již před samotnou přípravou měření je nutno stanovit podmínky a množinu rozšíření stávajících dat. Pro co nejpřesnější vystihnutí množiny stavů, které mohou na vozidle nastat, lze definovat tyto cíle měření:

- závislost svorkového napětí článku na vybíjecím proudu, hloubce vybití a teplotě
- závislost sériového odporu  $R_s$  na vybíjecím proudu, hloubce vybití a teplotě
- závislost dynamického odporu  $R_d$  na vybíjecím proudu, hloubce vybití a teplotě
- závislost dynamické kapacity  $C_d$  na vybíjecím proudu, hloubce vybití a teplotě
- závislost využitelné kapacity článku na vybíjecím proudu a teplotě

### **3.2.1 Definování konkrétního předmětu laboratorních testů**

Pro účely stanovení konkrétní metodiky a ověření její správné funkcionality je nutno omezit se pouze na akumulátorové články, jejichž chování lze kvalitativně validovat nejlépe v reálné aplikaci. Pro tento účel velice vhodně poslouží experimentální kolejové vozidlo, jež Dopravní fakulta Jana Pernera vlastní a je tímto k dispozici. Jak bude uvedeno podrobně v dalších kapitolách, vozidlo splňuje podmínky čistě akumulátorového provozu, přičemž celá zdrojová soustava se zakládá na technologii článků Li-ion LFP. Tímto lze podstoupit celý simulační řetězec včetně velice hodnotné validace.

Laboratorní testy lze tedy uskutečnit na identických LFP člancích z experimentálního kolejového vozidla, dále na člancích plánované modifikace stávajícího LFP aku packu na Li-pol a na LFP člancích použitých ve studentském experimentálním elektromobilu. Konkrétní parametry shrnuje následující tabulka.

Technologie	LFP	LFP	Li-pol
Výrobce	Winston Battery	Sinopoly	Kokam
Typové označení	WB-LYP40AHA	SP-LFP100AHA	SLPB 60216216
Poznámka	Stávající využití ve studentském experimentálním elektromobilu.	Stávající využití v experimentálním kolejovém vozidle.	Pro plánovanou modifikaci zdrojové soustavy experimentálního kolejového vozidla.
Jmenovité napětí [V]	3,2	3,2	3,7
Jmenovitá kapacita [Ah]	40	100	25
Vnitřní odpor [mΩ]	0,7	0,45	1,2
Počet cyklů [-]	>3000 (80% DOD)	>3000 (80% DOD)	>800 (80% DOD)
Objem [dm <sup>3</sup> ]	1	2,4	0,3
Hmotnost [kg]	1,6	3,6	0,6
Trvalý proud [A]	120	300	125
Krátkodobý proud [A]	400	1000	200
Jmenovitá energie [Wh]	128	320	92
Hmotnostní hustota energie [Wh/kg]	80	89	153
Objemová hustota energie [Wh/dm <sup>3</sup> ]	128	133	306
Maximální krátkodobý vyb. výkon [W]	1280	3200	740
Měrný krátkodobý výkon [W/kg]	800	889	1233
Trvalý vybíjecí výkon [W]	384	960	462
Měrný trvalý vybíjecí výkon [W/kg]	240	267	771
Ilustrační fotografie			

Tabulka 2 – Přehled měřených článků [6,8]

Cíl laboratorních testů představuje ucelený soubor charakteristik, jejichž upravená matematická podoba bude vystihovat článek za přesně daných podmínek. Každý z výše



uvedených článků má svá specifika a intervaly provozních hodnot, což musí laboratorní měření respektovat. Krajně nevhodná situace by mohla nastat v případě nevědomého poškozování článku během měření (například extrémním přehříváním, hlubokým vybíjením, přebíjením apod.).

Články WB-LYP40AHA a SP-LFP100AHA představují typické zástupce technologie LFP. Jejich napěťový rozsah je popsán intervalem 2,5 – 4V. Technologie LFP umožňuje jistou benevolenci v případě přebíjení. Plné nabití článků LFP vykazuje již při napětí okolo 3,8V, ačkoli je možno ho bez ohledu na výrazné snížení životnosti nabít na tradičních 4,2V [6]. Vybíjecí podmínky působí striktněji. Pro cyklický provoz se nedoporučuje vybíjet články pod 80% DOD, jinak hrozí urychlený pokles životnosti. Oproti tomu v případě cyklického provozu s nízkou hloubkou vybití lze životnost výrazným dílem zvýšit. Laboratorní testy ovšem nesplňují podmínky dlouhodobého cyklického provozu, tudíž články LFP budou vybíjeny na 100% hladinu DOD. Co se týče vybíjecího proudu, katalogové listy [6] uvádějí hodnoty trvalého vybíjecího proudu až do 3C. Nabíjecí proudy dosahují hodnot do 1C.

Článek SLPB 60216216 představuje typického zástupce technologie Li-pol, konkrétně HE NMC (High Energy Nikl Mangan Kobalt). Technologie Li-pol NMC již není v oblasti přebíjení schopná takových tolerancí jako technologie LFP. Nabíjecí napětí musí být striktně omezeno na maximální hodnotu 4,2V a vybíjecí napětí pak na 2,7V. Dlouhodobé vybíjecí proudy u článku 60216216 dosahují hodnot až 5C, krátkodobě až 8C. Při laboratorních testech je zásadně důležité svědomitě dodržovat všechna doporučení a pracovní intervaly s ohledem nejen na bezpečnost a požární ochranu při práci.

Z výše uvedeného lze stanovit základní výčet konkrétních pracovních veličin:

- WB-LYP40AHA: Max. vybíjecí proud 120A, Napěťový interval 2,5 – 4V
- SP-LFP100AHA: Max. vybíjecí proud 300A, Napěťový interval 2,5 – 4V
- SLPB 60216216: Max. vybíjecí proud 125A, Napěťový interval 2,7 – 4,15V

Pro vystihnoutí široké škály provozních stavů reálného vozidla, s přihlédnutím na reálně dostupné měřicí zařízení a respektování výše uvedených pracovních veličin, lze sumarizovat měřicí plán následovně:

- **Měření vybíjecích charakteristik a vnitřního odporu  $R_s$  při pokojové teplotě 25°C**  
WB-LYP40AHA – 0,5C, 1C, 1,5C, 2C, 2,5C  
SP-LFP100AHA – 0,2C, 0,4C, 0,6C, 0,8C, 1C, 1,5C, 2C  
Kokam SLPB 60216216 – 0,5C, 1C, 2C, 3C, 4C
- **Měření vybíjecích charakteristik a vnitřního odporu  $R_s$  při teplotě 40°C**  
WB-LYP40AHA – 0,5C, 1C, 2,5C  
SP-LFP100AHA – 0,2C, 0,6C, 1C  
Kokam SLPB 60216216 – 1C, 2C, 4C
- **Měření vybíjecích charakteristik a vnitřního odporu  $R_s$  při teplotě 0°C**  
WB-LYP40AHA – 0,5C, 1C, 1,5, 2,5C

SP-LFP100AHA – 0,2C, 0,6C, 1C

Kokam SLPB 60216216 – 0,5C, 1C, 2C, 4C

- **Měření dynamického odporu  $R_d$  a dynamické kapacity  $C_d$  při teplotě 25°C**

WB-LYP40AHA – 1C, 1,5C, 2,5C

SP-LFP100AHA – 0,2C, 0,8C, 1C, 1,5C

Kokam SLPB 60216216 – 1C, 2C, 4C

- **Měření dynamického odporu  $R_d$  a dynamické kapacity  $C_d$  při teplotě 40°C**

WB-LYP40AHA – 1C, 1,5C, 2,5C

SP-LFP100AHA – 0,2C, 0,6C, 1C

Kokam SLPB 60216216 – 1C, 2C, 4C

- **Měření dynamického odporu  $R_d$  a dynamické kapacity  $C_d$  při teplotě 0°C**

WB-LYP40AHA – 1C

SP-LFP100AHA – 1C

Kokam SLPB 60216216 – 1C

Měření obsahuje skupinu bezmála šedesáti rozdílných případů a dle velikostí vybíjecích proudů a kapacit lze odhadnout, že se časová alokace pro realizaci měření pohybuje v řádech stovek hodin.

Uvedený popis měřicího plánu uvádí měření při třech teplotách článku - 0°C, 25°C a 40°C. Jedná se o teplotu okolního prostředí, přičemž měřený článek je v daném prostředí aklimatizován po dobu několika hodin před měřením. Během samotného měření teplota článku není cíleně regulována z důvodu navození stavu podobného, jako v reálné aplikaci s konstantní teplotou okolí. Teplota 0°C byla navozena za pomoci chladničky, teplota 25°C pak přirozenou teplotou okolního vzduchu v laboratoři během letních měsíců a teplota 40°C pak za pomoci přesné sušicí pece.

Měřicí pracoviště pro laboratorní testy při zvýšení teplotě vypadá následovně:



Obrázek 18 - Měřicí pracoviště pro měření článků při zvýšené teplotě

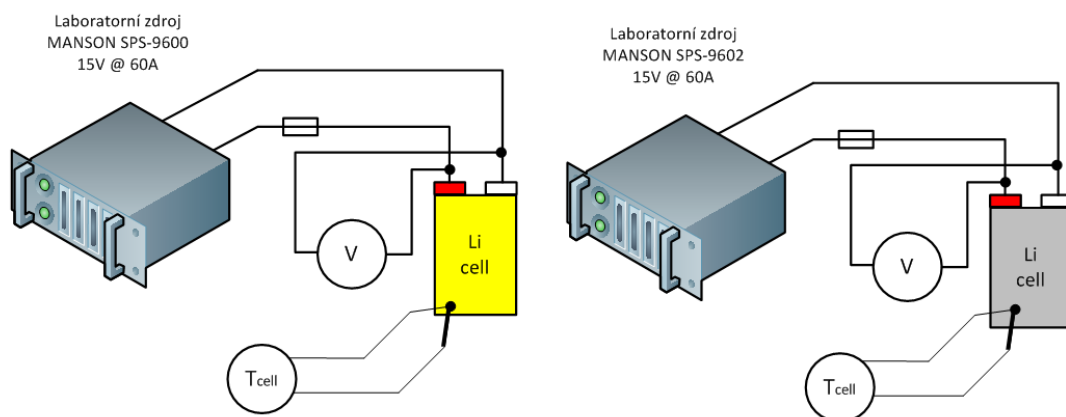
### 3.2.2 Popis měřicího pracoviště

Pro systematické laboratorní měření je zásadně důležité dodržet stále stejné výchozí podmínky. Rozhodující faktor představuje finální stav nabití každého z článků. Při nedodržení stejné hladiny nabití SOC by mohly být výsledky zatíženy chybou. Nabíjecí podmínky pro technologii LFP představuje nabíjení zdrojem konstantního napětí 4V s proudovým omezením 60A či 30A dle použitého zdroje. Jedná se tedy o typické nabíjení režimem IU, kdy bylo stanoveno, že článek lze považovat za plně nabitý v případě poklesnutí nabíjecího proudu v režimu U pod hodnotu odpovídající  $C/200$ . Pro případ LFP 100Ah tento reziduální proud činí 500mA, pro případ LFP 40Ah činí reziduální proud 200mA. Pro nejpresnější stanovení totožných podmínek pro každé z měření by samozřejmě vycházelo jako nejvýhodnější zvolit velikost reziduálního proudu co nejmenší. Ovšem vzhledem ke značné časové náročnosti měření toto nebylo zavedeno.

#### Režim nabíjení:

Pro případ nabíjení článků technologie Li-pol NMC reziduální proud opět dosahuje hodnoty  $C/200$ , tedy 125mA, a nabíjecí napětí je omezeno na hodnotu 4,15V. U technologie Li-pol vzhledem k respektování bezpečnostních zásad a absence nadřazeného systému BMS nelze riskovat plné nabití, tedy SOC=100%, za cenu možné destrukce článku během nabíjení.

Pro režim nabíjení se pracoviště skládalo z uvedených komponent:



Obrázek 19 - Schéma nabíjecího stanoviště

Základ nabíjecího stanoviště tvoří dva spínané laboratorní zdroje Manson SPS-9600 a SPS-9602. Tyto laboratorní zdroje lze provozovat v režimu proudového omezení, což pro případ nabíjení Li-ion, respektive Li-pol, článků představuje žádoucí stav. Dva laboratorní zdroje byly využity pro možnost urychlení nabíjecího procesu, kdy je možno nabíjet dva neměřené články zároveň. Přesné nastavení výstupního napětí probíhalo pomocí paralelně připojeného voltmetru, jehož funkce byla využita i při měření skutečného svorkového napětí během nabíjení. V nabíjecím obvodu lze sledovat absenci dodatečného ampérmetru, v tomto případě se spoléhá na panelové měřidlo laboratorního zdroje, jenž pro zjištění reziduálního proudu vykazuje přiměřenou přesnost. Mezi důležité bezpečnostní prvky patří jištění a možnost měření povrchové teploty bezkontaktním teploměrem.

Po režimu nabíjení každý článek podstoupil přibližně patnáctiminutovou stabilizaci dynamických časových konstant.

Ilustrační fotografie nabíjecího stanoviště:



Obrázek 20 - Reálná fotografie měřicího pracoviště

### Režim vybíjení:

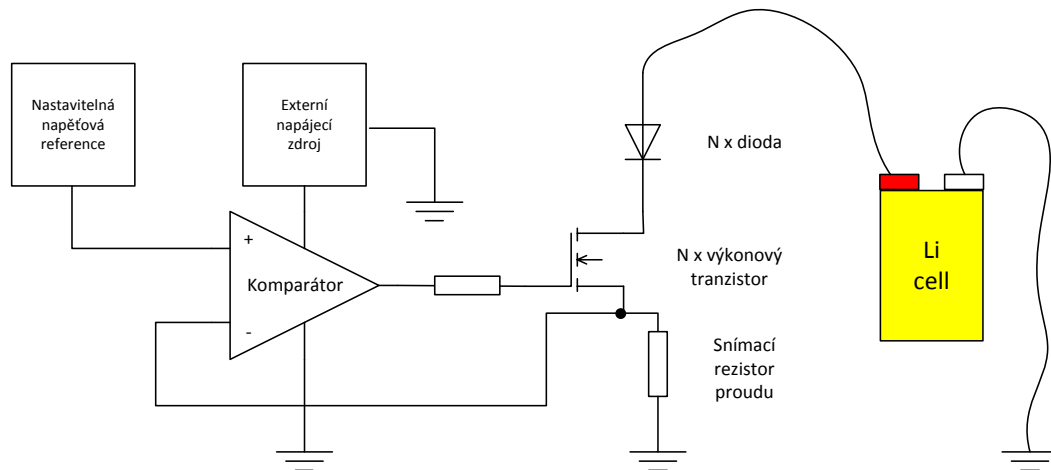
Z analýzy měřicího plánu vybraných článků je nejprve nutno respektovat nejnáročnější případy vybíjecího proudu. Právě na vybíjecím proudu závisí složitost a dimenzování zařízení, jež bude články periodicky vybíjet. Požadavky na vybíjecí zařízení lze z pohledu výkonové elektroniky shrnout do následujících bodů:

- Zařízení musí být schopno zatěžovat měřený akumulátor proudem o velikosti až 200A (SP-LFP100AHA 2C), přičemž ztrátový výkon při plně nabitém akumulátoru bude dosahovat hodnoty až 800W.
- Zařízení musí být schopno udržet konstantní hodnotu proudu bez ohledu na svorkové napětí článku (bez ohledu na velikost DOD).
- Zařízení musí mít robustní konstrukci a disponovat funkcí rychlého nastavování odebíraného proudu.
- Zařízení musí být odolné proti případnému přepólování měřeného článku – i přes jednoznačné značení terminálů a vodičů existuje nezanedbatelná pravděpodobnost, že obsluha pracoviště polaritu invertuje. Následky v případě zkratu by mohly být fatální.
- Zařízení musí být mobilní pro možnost přemísťování.

První bod vyžaduje možnost vysokých vybíjecích proudů. Nejjednodušší variantou koncepce vybíjecí zátěže pro vysoké proudy může představovat zapojení Cu vodiče o vhodném průřezu a délce tak, aby elektrický odpor tohoto vodiče následně umožňoval průchod žádaného proudu.

Jelikož svorkové napětí článku vykazuje silnou závislost na DOD a elektrický odpor vodiče též není v závislosti na teplotě konstantní, nejjednodušší varianta využití zátěže coby Cu vodiče není možná. Vhodnou variantou koncepce zařízení musí být nutně polovodičová aktivní zátěž vybavená zpětnou vazbou pro konstantní proudový režim.

Níže uvedený obrázek schematicky popisuje příklad koncepce analogové zpětnovazební aktivní zátěže s možností nastavení vybíjecího proudu.

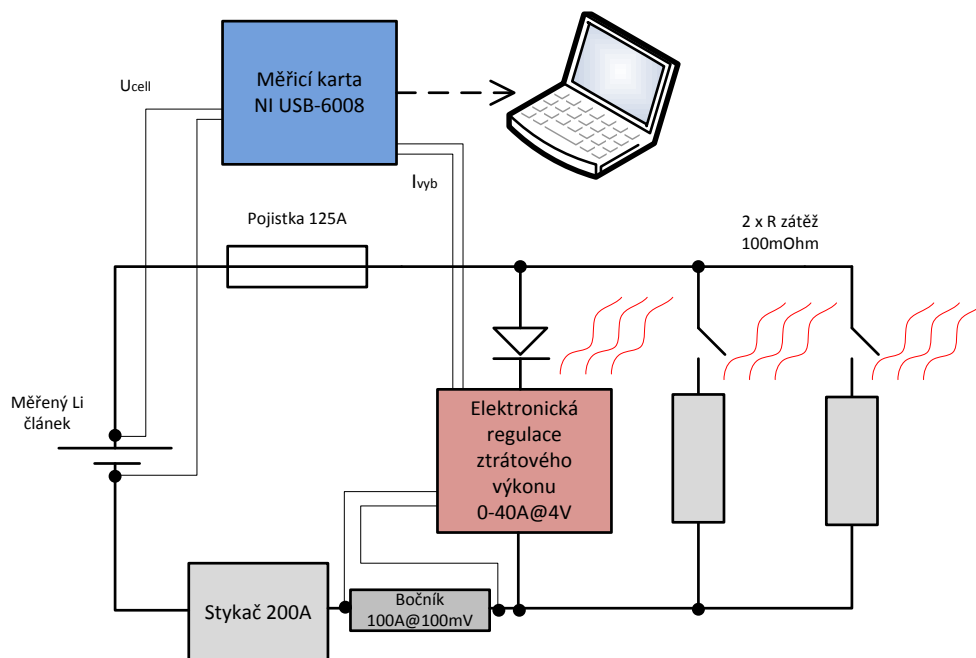


Obrázek 21 - Elektronická regulace ztrátového výkonu - principiální schéma

Základ zapojení tvoří operační zesilovač v zapojení jako komparátor, napěťová reference, výkonový tranzistor a snímací rezistor proudu. Na neinvertující vstup je přivedeno referenční napětí, přičemž pokud toto napětí svoji hodnotou převyšuje napětí invertujícího vstupu, výstup vykazuje kladné saturační napětí. Princip činnosti je založen na snímání úbytku napětí na snímacím rezistoru proudu, jenž reprezentuje velikost procházejícího proudu. Tento úbytek je porovnáván s referencí a operační zesilovač poté otevře tranzistor tak, aby byl rozdíl napětí na vstupech operačního zesilovače nulový. Velikost napětí napěťové reference pak určuje procházející proud. Z principu činnosti zapojení je patrné, že tranzistor pracuje v lineárním režimu a veškerá energie je mařena na polovodičovém prvku. Ochranu proti přepólování tvoří dioda.

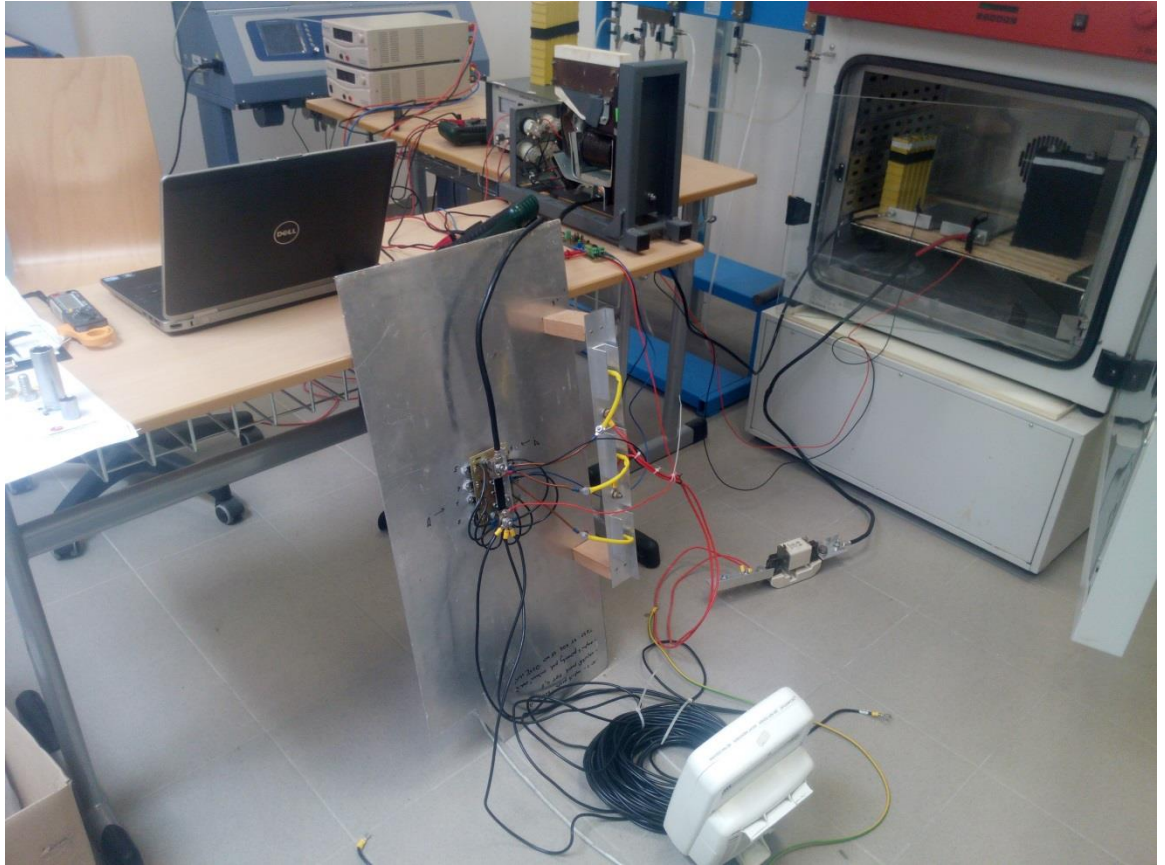
Z požadavků režimu vybíjení vyplývá, že uvedená aktivní regulace ztrátového výkonu splňuje druhý z bodů. Jelikož maření ztrátové energie probíhá pouze na pouzdrech polovodičových prvků, existují zde jistá omezení. V případě přehřátí a destrukci polovodiče by vznikl tvrdý zkrat znehodnocující celé zařízení. Špičkový ztrátový výkon aktivní zátěže by měl dle měřicího plánu dosahovat hodnoty 800W, což by pro bezpečné chlazení například pouzder TO220 znamenalo několik desítek paralelně řazených výkonových prvků. Paralelní řazení polovodičových prvků má svá úskalí v oblasti nestejnomyšerného rozvážení procházejícího proudu, které ovlivňuje jak výrobní tolerance, tak rozdílná teplota pouzder tranzistorů.

Pro aplikaci vybíjecího zařízení je nutno učinit kompromis, který v sobě integruje jak možnost vysokých vybíjecích proudů, tak přesnost regulace. Výsledné zařízení včetně zpracování požadovaných signálů je popsáno na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 22 - Měřicí pracoviště pro komplexní laboratorní zkoušky

Základ měřicího pracoviště tvoří měřený článok. Elektrický proud vycházející z kladného pólu článku prochází přes tavnou pojistku. Její hodnota je volena v závislosti na velikosti vybíjecího proudu – pro případ vybíjení proudem do hodnoty 100A využívá zařízení pojistku 125A, v případě několika měření nad 100A využívá zařízení pojistku 200A. Za pojistkou následuje dioda (konkrétně 3 paralelně řazené výkonové diody Semikron) a modul elektronické regulace ztrátového výkonu. Paralelně k modulu jsou zapojeny vypínatelné výkonové odporníky s ohmickým odporem 100mΩ. Majoritní část elektrického proudu tedy prochází odporníky a zbývající část elektronickou regulací ztrátového výkonu. Součet těchto proudů prochází snímacím rezistorem, jehož úbytek je využíván pro zpětnovazební regulaci proudu elektronické zátěže. Při vhodné volbě elektrického odporu odporníků modul elektronické regulace ztrátového výkonu funguje pouze jako kompenzační člen. Pro vybíjecí proudy do 40A nejsou přídavné odporníky potřeba a veškerá energie se maří na výkonových tranzistorech. Pro případ rozpínání a spínání obvodu slouží výkonový stykač, jehož kontakty disponují proudovou zatížitelností až 200A DC.



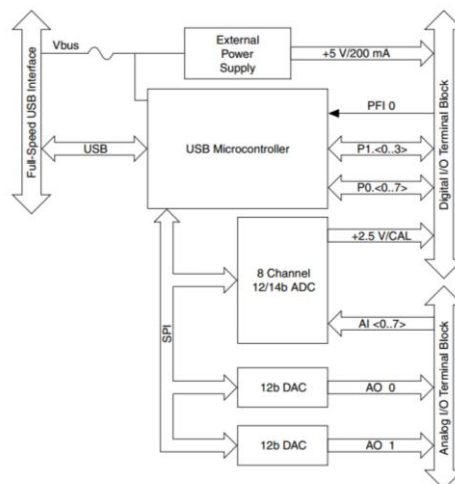
*Obrázek 23 - Měřicí pracoviště pro komplexní laboratorní zkoušky – reálné provedení*

Ve střední části obrázku 23 se na rozměrném Al chladiči nachází blok elektronické regulace ztrátového výkonu, které předchází tavná pojistka. Výkonové odporníky představuje Cu vodič  $6\text{mm}^2$  s černou izolací ve spodní části obrázku. Nad Al chladičem je možno nalézt výkonový 200A stykač. Celé pracoviště bylo v průběhu každé zkoušky nuceně chlazeno přídavným ventilátorem.

Důležitou partií měřicího pracoviště je snímání elektrického proudu a svorkového napětí článku. V případě snímání svorkového napětí článku musí měřicí sondy splňovat požadavky eliminace parazitních napěťových úbytků na vodičích protékaných proudem, tudíž jsou instalovány přímo na terminály článku. Měření proudu probíhá přímo na snímacím rezistoru proudu s převodem  $1\text{mV}=1\text{A}$ . Rozhraní mezi uživatelským PC a měřicím pracovištěm obstarává měřicí karta výrobce National Instruments NI USB-6008.



Obrázek 24 - Měřicí karta NI USB-6008

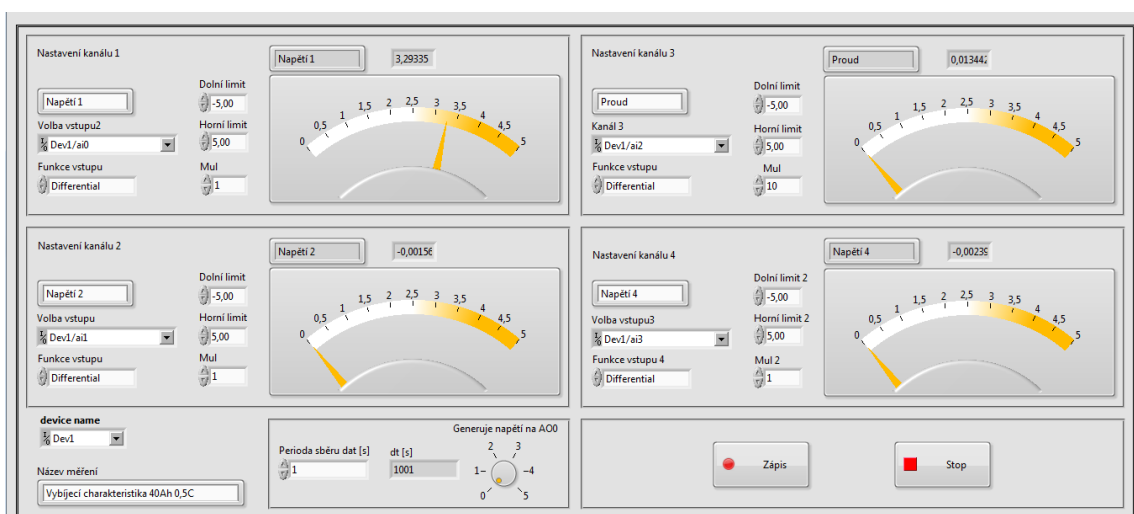


Obrázek 25 - Blokové schéma měřicí karty NI

Měřicí karta disponuje komunikační linkou USB, prostřednictvím které je připojena k uživatelskému PC. Mezi stěžejní parametry patří:

- 8 analogových vstupů 12 bit, vzorkovací frekvence 10kS/s a  $U_{\max} \pm 10V$
- 2 analogové výstupy 12 bit
- 12 digitálních vstupů / výstupů
- 32bit čítač s USB rozhraním

Pro účely měřicího pracoviště byly využity dva analogové vstupy v diferenciálním zapojení pro možnost měření na různých potenciálech. Měřená data jsou nejprve zpracována měřicí kartou a následně odeslána do PC k dalšímu využití nadřazeným softwarem, jehož uživatelské rozhraní popisuje níže uvedený obrázek.



Obrázek 26 - Rozhraní měřicího systému v prostředí Windows

Obslužný software byl vytvořen pomocí programovacího jazyka LabView, jenž byl k tomuto účelu předurčen výběrem měřicí karty stejného výrobce. Rozhraní umožňuje

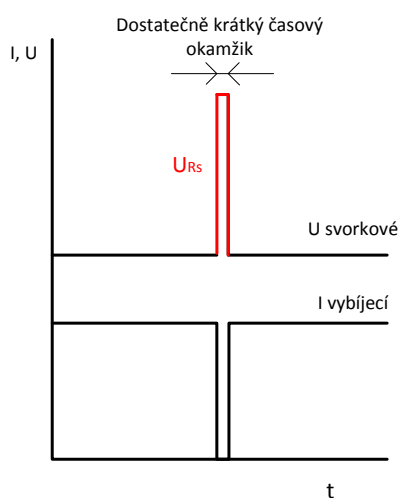


obsahu čtyř vybraných analogových kanálů měřicí karty s možností nastavení parametrů jako limity panelového měřidla, děličky, názvy, perioda sběru dat apod. Zápis probíhá do souboru s příponou \*.tdms, z něhož lze vhodným softwarovým vybavením data transformovat do excelovské podoby. Během měření byla zvolena frekvence sběru dat po jedné vteřině, což činí dobrý kompromis mezi množstvím zpracovávaných dat a přesností.

### 3.2.3 Volba metodiky měření s ohledem na vybraný model článku

Během měřicí procedury je nutno logovat data takovým způsobem, aby bylo možno z jejich sumarizace vyseparovat potřebné neznámé – tedy vybíjecí charakteristiku, odpor  $R_s$ , odpor  $R_d$  a kapacitu  $C_d$ .

Z náhradního schématu kapitoly 1.7.2 plyne, že sériový odpor  $R_s$  představuje statický prvek modelu a jeho uplatnění je v závislosti na odebíraném proudu okamžité.



Obrázek 27 - Metoda určení sériového odporu  $R_s$

Statický sériový odpor  $R_s$  lze získat jednoduchou měřicí metodou, kdy je vybíjecí proud o známé velikosti přerušen a vzniklý přírůstek napětí v dostatečně krátkém časovém okamžiku určí hodnotu odporu dle vzorce:

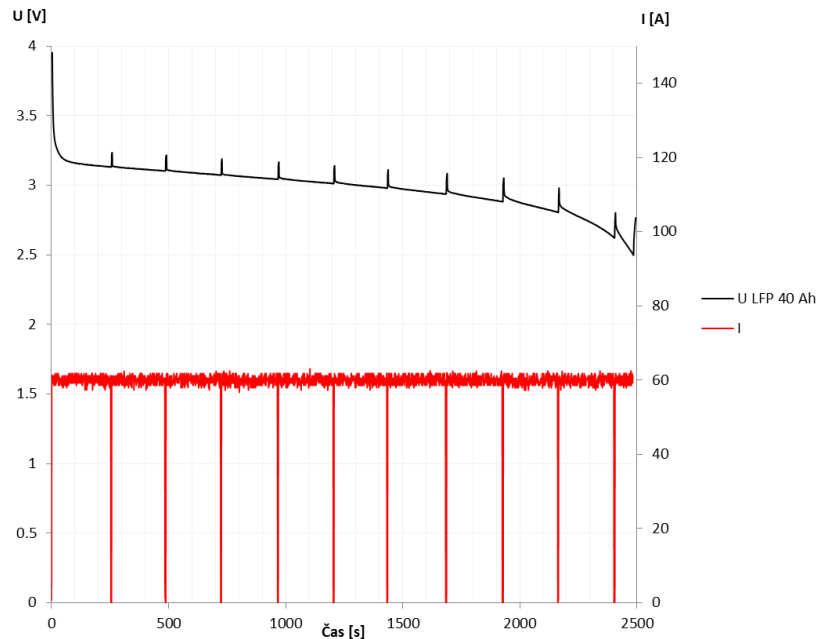
$$R_s = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| \quad (17)$$

Měření sériového odporu lze efektivně sloučit s měřením vybíjecí charakteristiky. V rámci zjištění závislosti  $R_s$  na stupni vybití bylo vytvořeno deset měřicích intervalů vždy po 10% DOD.

Chronologický postup měření:

- Příprava plně nabitého článku dle již uvedených kritérií
- Zapojení článku do měřicího pracoviště správnou polaritou
- Nastavení požadovaného proudu zátěže na modulu elektronické regulace ztrátového výkonu
- Nastavení logovacího softwaru – vhodné děličky, rozsahy, volby vstupů

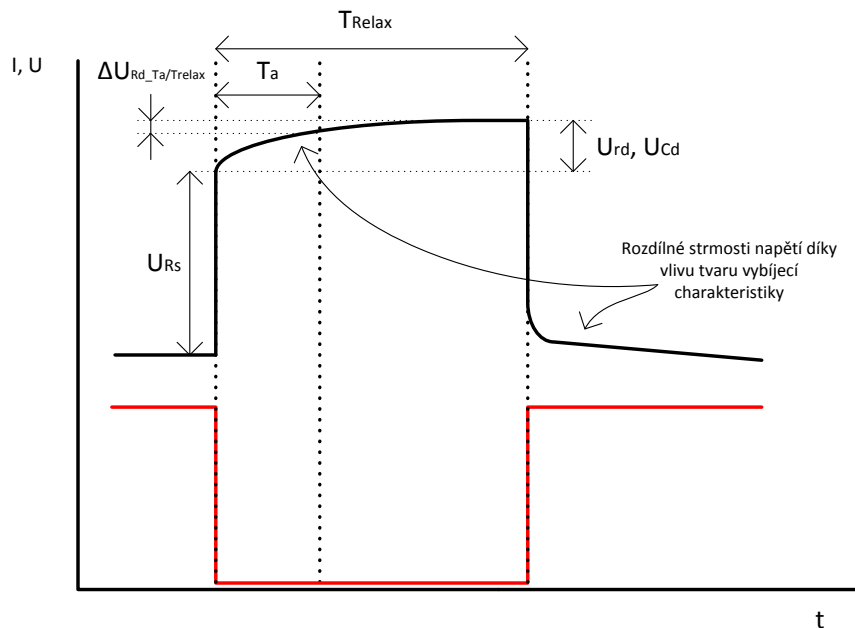
- Volba vhodného počtu paralelně řazených odporníků
- Sepnutí výkonového stykače
- Přesné doladění vybíjecího proudu klešťovou sondou
- Měření času pro výpočet měřicích bodů pro odečet  $U_{RS}$
- Periodické rozpínání výkonového stykače v daných časových intervalech na dobu přibližně 5s až do úplného vybití



Obrázek 28 - reálný průběh článku LFP 40Ah 25°C při měření vybíjecí charakteristiky a  $R_s$

Graf na obrázku 28 popisuje reálné chování článku WB-LYP40AHA v případě měření sériového odporu  $R_s$  a vybíjecí charakteristiky. Z grafu lze již na první pohled identifikovat, že testovaný sériový vnitřní odpor na hloubce vybití závislost vykazuje. Čím vyšší DOD, respektive čas vybití, tím jsou patrnější vyšší úbytky  $U_{RS}$ . Tímto způsobem probíhalo měření všech článků za teplot 25°C, 40°C a 0°C pro vybrané vybíjecí proudy.

Měření dynamických parametrů  $R_d$  a  $C_d$  vyžaduje navození takových stavů měřicím systémem, kdy se očekávaná dynamika projeví. Typickým příkladem vhodného měřicího postupu je periodické spínání zátěže podobným způsobem jako v předcházejícím případě, ale s násobně delší dobou bezproudého stavu, tzv. dobou relaxace [14, 13]. Relaxace představuje takový stav článku, kdy na jeho svorkách nedochází k příjmu či výdeji energie. V tomto stavu se stabilizují časové konstanty vzniklé případným předchozím proudovým odběrem či dobíjením. Doba relaxace úzce souvisí s časovou konstantou dynamické soustavy, jež článek v interpretaci Theveninova modelu představuje.



Obrázek 29 - Popis parametrů dynamické odezvy napětí článku

Výše uvedený obrázek popisuje principiální dynamické chování a významné parametry průběhu. Výchozím stavem uvažujeme článek, jenž má ustálené časové konstanty a z jeho svorek je odebrána konstantní hodnota proudu. V případě přerušení proudu svorkové napětí článku okamžitě vzroste z důvodu snížení úbytku na sériovém odporu  $R_s$ . Po odeznění tohoto rychlého děje se začne uplatňovat dynamická složka napěťové odezvy. Jelikož byl uvažován výchozí stav jako ustálený, napětí paralelní kombinace  $R_d$  a  $C_d$  je proto bezprostředně po rozpojení obvodu maximální a ihned exponenciálně klesá. Tento pokles napětí  $U_{rd} = U_{cd}$  se projevuje právě v pozvolném exponenciálním vzrůstu svorkového napětí. Indikátor konce dynamické odezvy představuje vybití kapacity  $C_d$  rezistorem  $R_d$  a je jím ustálený stav. Po opětovném sepnutí zátěže opět poklesne napětí o úbytek na sériovém odporu  $R_s$  a opětovně dochází k nabíjení kapacity  $C_d$ . Doba  $T_{relax}$  znázorňuje časový úsek, kdy dochází k ustálení dynamické složky napětí. Jedná se o údaj, který je ještě před samotným laboratorním měřením nutno zjistit pro účely stanovení univerzální doby relaxace pro všechny články a tím poskytnout stejné podmínky pro všechny měřicí případy.

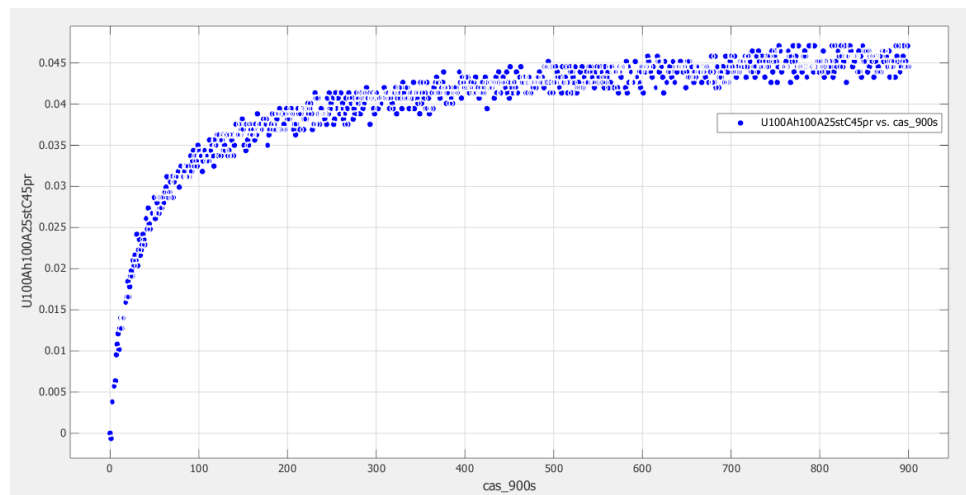
V případě měření sériového odporu  $R_s$  bylo zvoleno v celém rozsahu DOD deset měřicích bodů. Nižší počet bodů by nijak výrazně neovlivnil dobu měření (zkrácení o přibližně půl minuty), ale zásadním způsobem by ovlivnil přesnost vykreslení. V případě měření dynamických parametrů nastává zásadní problém – čas. Má-li být výsledná závislost  $C_d$  a  $R_d$  na DOD dostatečně věrohodná a charakterizovat výsledný trend, musí zahrnovat co největší množství měřicích bodů. V případě volby deseti bodů by vlivem nutné doby relaxace trvala až o 1,5h déle než měření v případě  $R_s$ . Vynásobením doby relaxace 1,5h a počtem měřicích případů 22 lze získat časovou náročnost celkové doby relaxace až 33h. Z úsporných důvodů je nutno zavést jistá zjednodušení, jež měřicí čas uspoří.

Efektivní metody snižující měřicí čas:

- Snížení počtu měřicích bodů v rámci jednoho měření na 5 bodů – vždy pro hloubku vybití 5%, 25%, 45%, 65%, 85% DOD.

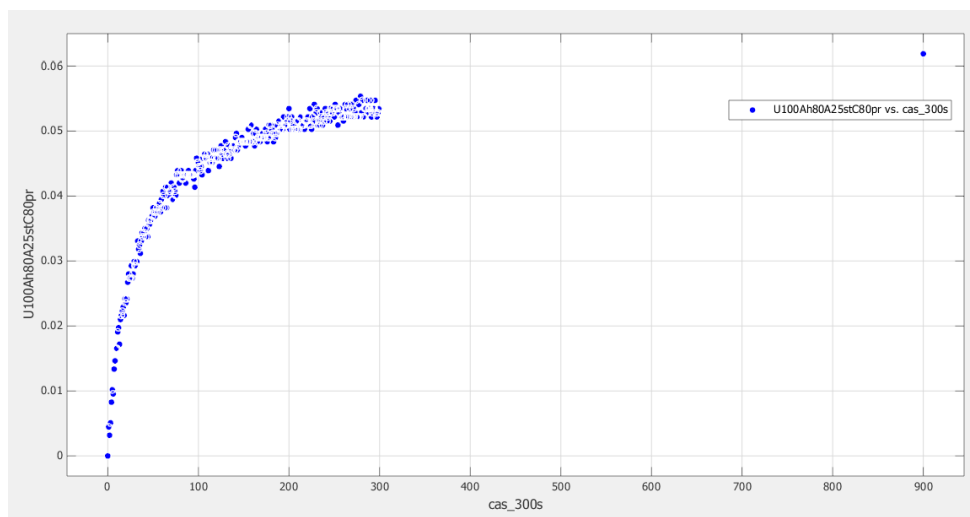
- Dobu relaxace o délce  $T_{\text{relax}}=15\text{min}$  aplikovat pouze na články, jež jsou vybíjeny proudem 1C.
- V případě vybíjení jinými proudy než 1C snížit dobu relaxace z  $T_{\text{relax}}$  na  $T_a$  – viz obrázek 29.
- Doba  $T_a$  zvolena o délce 5min – jedná se o dobu, kde  $dU/dT$  nabývá nejvyšších hodnot.
- Zvolení vhodné časově méně náročné metodiky, která přetransformuje napěťový průběh z časového intervalu  $T_a$  na interval  $T_{\text{relax}}$  při zachování dostatečné přesnosti.

Reálně naměřené průběhy odezvy svorkového napětí charakterizují níže uvedené obrázky:



Obrázek 30 - Dynamická odezva napětí článku pro dobu relaxace 15 min

Obrázek 30 znázorňuje dynamickou složku napěťové odezvy článku LFP 100Ah při přerušení vybíjecího proudu 100A, 45% DOD a 25stC. Z průběhu je patrný exponenciální trend s předem určenou dobou relaxace 15 min. Po uplynutí stanovené doby lze říci, že dynamický děj majoritně odezněl. Delší doba relaxace by výpočty do jisté míry mohla zpřesnit, ale dosažené procentuální vylepšení by bylo vykoupeno neúměrně prodlouženou časovou dotací pro měřicí proces.



Obrázek 31 - Dynamická odezva napětí článku pro dobu relaxace 5 min

Obrázek 31 též znázorňuje reálnou dynamickou složku napěťové odezvy po odlehčení měřeného článku. Zde se jedná o případ vybíjecího proudu 80A článku LFP 100Ah, 80% DOD a 25stC. Doba logování je omezena na předem stanovených 5 min.

Určení parametrů  $R_d$  a  $C_d$  je podmíněno následujícími body:

- Pro určení parametru  $R_d$  je nutno znát ustálenou hodnotu dynamické složky napětí.
- Pro určení parametru  $C_d$  je nutno vyjádřit časovou konstantu odezvy.

Postup určení parametrů  $R_c$  a  $R_d$ :

- Naměření dynamických odezev u daného článku při velikosti odebíraného proudu 1C, přičemž délka relaxace činí  $T_{relax}=15min$ .
- Naměření dynamických odezev u stejného článku při jiných velikostech vybíjecího proudu, přičemž délka relaxace činí pouze  $T_a=5min$
- Z charakteristiky změřené při proudu 1C zjistit průměrný procentuální přírůstek napětí mezi časy 5min a 15 min pro všechny měřicí body – tedy pro hloubku vybití 5%, 25%, 45%, 65%, 85% DOD

$$\Delta U_{5-15min\_5\% DOD} = \frac{U_{15min\_5\% DOD}}{U_{5min\_5\% DOD}} \cdot 100[\%] \quad (18)$$

$$\Delta U_{5-15min\_prumer} = \frac{\sum \Delta U_{5-15min\_n\% DOD}}{5} [\%], n = 5, 25, 45, 65, 85 \quad (19)$$

- Tento zjištěný procentuální přírůstek aplikovat na totožné články měřené za podmínek  $T_a=5min$ , přičemž výsledné napětí  $U_{Cd,Rd}$  například pro měřicí bod při 80% DOD lze vypočítat jako:

$$U_{Cd,Rd\_80\% DOD} = U_{Ta=5min} \cdot \frac{\Delta U_{5-15min\_prumer}}{100} [V] \quad (20)$$

### 3.2.4 Postup separace dynamického odporu a kapacity z naměřených průběhů

Postup separace dynamického odporu spočívá ve zjištění či výpočtu ustálené hodnoty dynamické odezvy napětí  $U_d$ . Při znalosti hodnoty vybíjecího proudu lze dynamický odpor definovat jako:

$$R_d = \frac{U_d}{I_{\text{vybíjecí}}} [\text{Ohm}] \quad (21)$$

Určení dynamické kapacity  $C_d$  zahrnuje jistá zjednodušení. Tvar reálné dynamické odezvy napětí svým charakterem silně připomíná odezvu soustavy 1. řádu, kdy se jedná o čistou exponenciální závislost, přičemž reálná shoda není zcela úplná. V případě využití Theveninova modelu využívajícího pouze jedné časové konstanty zde vzniká jistá chyba, jenž je daní za volbu jednoduššího modelu.

Pro výpočet kapacity  $C_d$  platí:

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} \quad (22)$$

Poslední neznámou představuje časová konstanta  $\tau$ . Časovou konstantu lze definovat pomocí třech přístupů:

- Časová konstanta představuje takový čas, kdy by napětí (či obecně jiná stavová veličina) měřené soustavy stoupalo ve směrnici tečny ke křivce v počátečním bodě a dosáhlo asymptoty koncové ustálené hodnoty. Jedná se tedy o čas daný průsečíkem asymptoty ustálené hodnoty odezvy a tečny ke křivce v počátečním bodě.
- Délku odeznění přechodného děje lze předpokládat čas  $3\tau$  (po době  $3\tau$  dojde ke snížení dynamické složky stavové veličiny na 5%, po době  $5\tau$  přibližně na 1% )
- Stavová veličina nabývá po uplynutí doby dané časovou konstantou  $\tau$  hodnoty 63,2%

Pro aplikaci vyjádření časové konstanty z naměřených dat nelze aplikovat první z možností, neboť stanovení přesné směrnice tečny vlivem různorodých odchylek naměřených dat by mohlo činit nezanedbatelnou chybu. Ostatní dvě možnosti platí výhradně pro čistě exponenciální průběh, tudíž pro aplikaci na měřený průběh též nejsou vhodné.

Vyjádření časové konstanty je v důsledku výše popsaných faktů nutno svěřit aparátu, jenž aplikuje některou z aproximačních metod a časovou konstantu matematicky z naměřených dat vyjádří. Pro tento účel plně vyhovuje prostředí Matlab a jeho nadstavbové toolboxy.

Obrázek 32 níže popisuje nadstavbový toolbox s názvem Curve Fitting tool. Jedná se o nástroj, jenž umožňuje efektivně aproximovat zvolená data již předdefinovanými, či uživatelem matematicky popsanými průběhy po mocí vybraných aproximačních metod – například metoda Trust-region. Toolbox obsahuje pět základních partií:

- Oblast vstupních dat.

Jedná se o oblast označenou číslem 1. Uživatel může zvolit až troj rozměrný graf stávající se z X, Y a Z datových souborů.

- Oblast nastavení předpisu aproximační funkce.

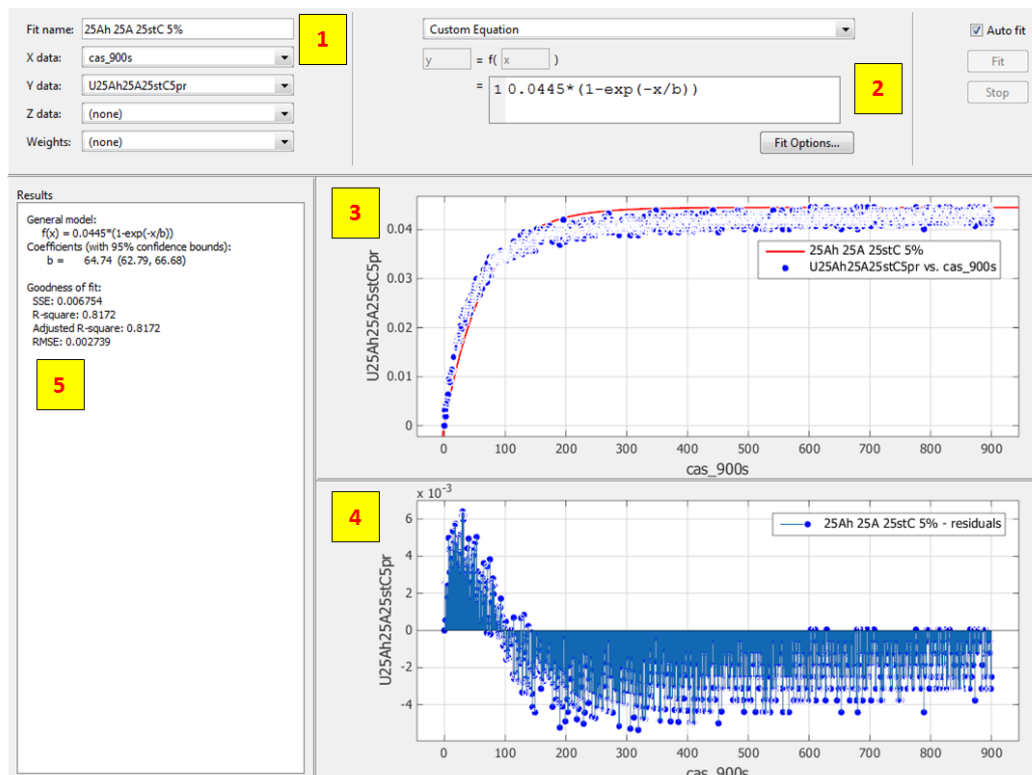
Oblast s označením 2. obsahuje možnost uživatelského popisu funkce matematickou funkcí či volbu již předdefinovaného průběhu, např.: polynomický průběh, exponenciální, racionální, atd.

- Výstupní grafické průběhy.

Grafické výstupy s označením 3. a 4. obsahují jak znázornění zdrojových dat v podobě jednotlivých měřených bodů, tak aproximační křivku. Pro možnost vyjádření velikosti jednotlivých odchylek toolbox umožňuje zobrazení výstupního grafu s názvem Residual plots, jenž obsahuje soubor všech odchylek aproximační křivky od originálních dat.

- Číselnou sumarizaci.

Důležitou částí toolboxu vyjadřuje blok s označením 5. Zde jsou uvedeny všechny požadované parametry matematického předpisu, jež byly vedené jako neznámé. Pro konkrétní příklad uvedený na obrázku níže vychází časová konstanta  $\tau = b = 64,74s$ .



Obrázek 32 - Uživatelské rozhraní toolboxu Curve Fitting Tool

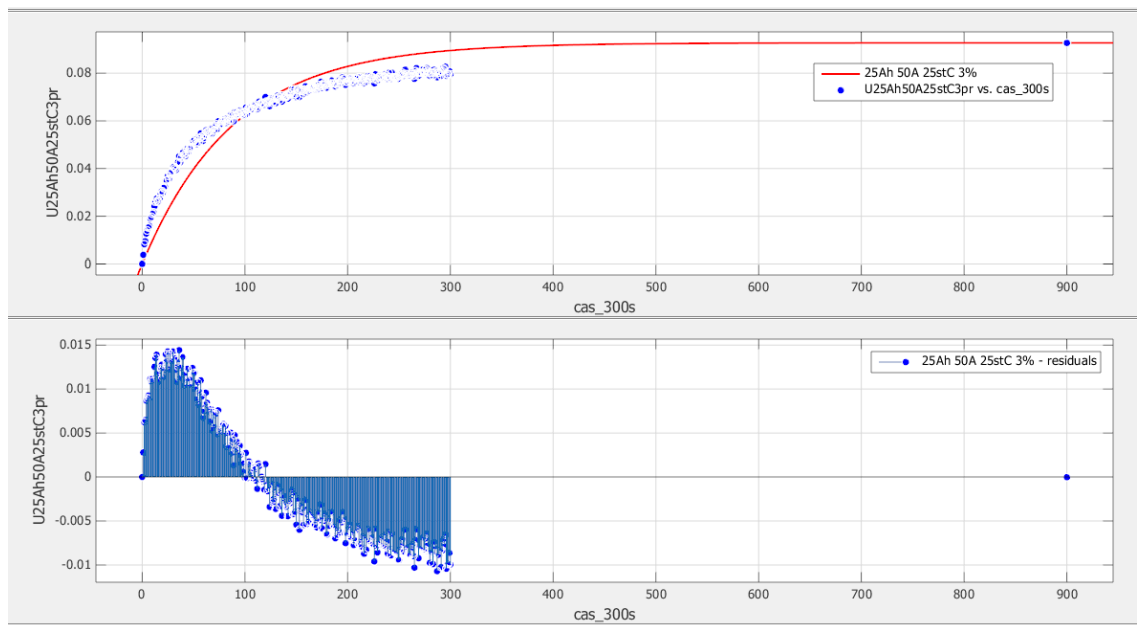
Pro účely aproximace naměřených dat byl využit matematický vztah pro výpočet okamžité hodnoty napětí na kondenzátoru RC článku, tedy:

$$u_c(t) = U_{C_{\max}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (23)$$

Za hodnotu  $U_{C_{\max}}$  bylo dosaženo napětí  $U_{Cd,Rd}$  konkrétního měřicího bodu, čas  $t$  představuje datový soubor měřeného času  $x$  a časovou konstantu  $\tau$  představuje neznámá  $b$ . Vztah pak přechází do podoby:

$$u_{Cd}(x) = U_{Cd,Rd} \cdot (1 - e^{-\frac{x}{b}}) \quad (24)$$

Grafické průběhy charakterizující aproximaci odezvy článku při měření pouze po dobu  $T_a$  vypadají následovně.



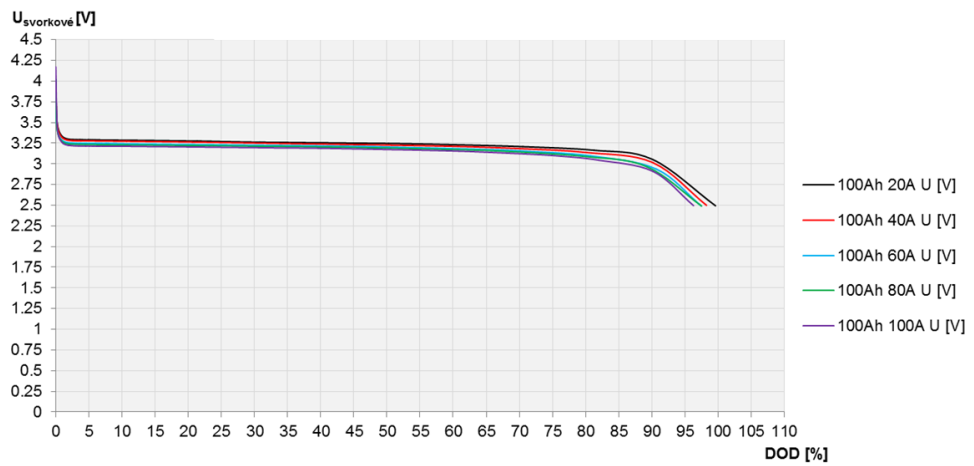
Obrázek 33 - Výsledný aproximovaný průběh napěťové dynamické odezvy

Z grafu je patrné, že naměřená data končí již v okamžiku  $T_a=300s$ . Dále následuje pouze koncový vypočítaný bod odezvy dle již popsané metodiky.

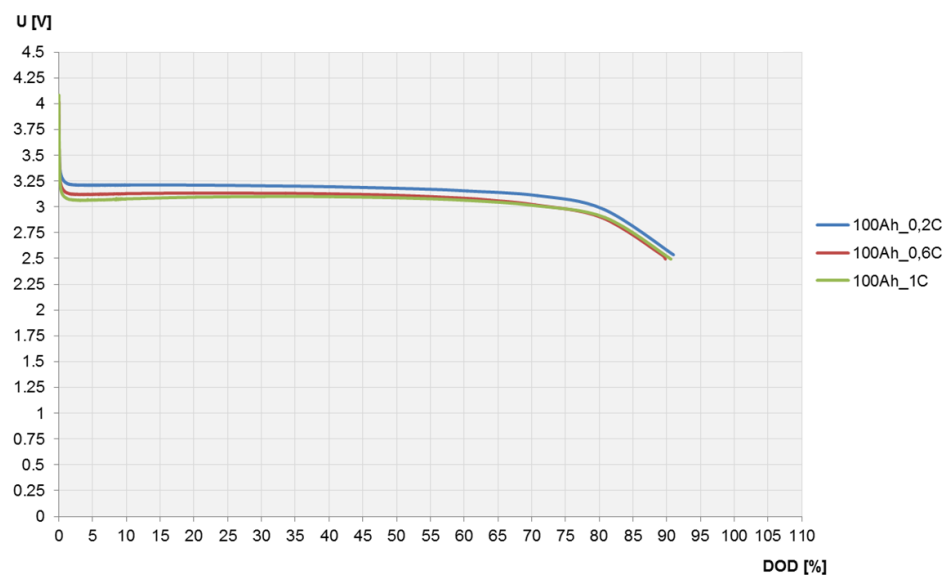


### 3.2.5 Sumarizace výsledků z laboratorního měření

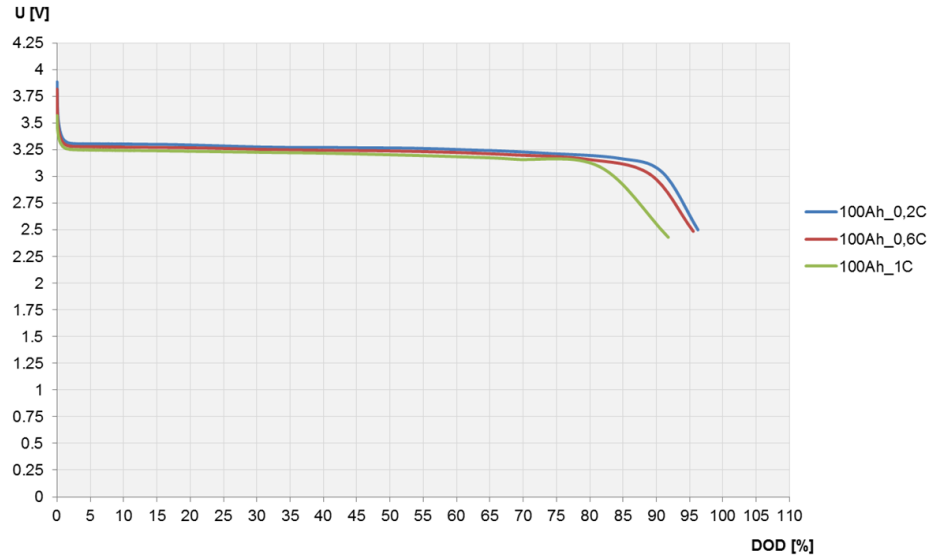
- Měření na článku LFP 100Ah – Statická měření



Obrázek 34 - Vybíjecí charakteristika LFP 100Ah 25stC



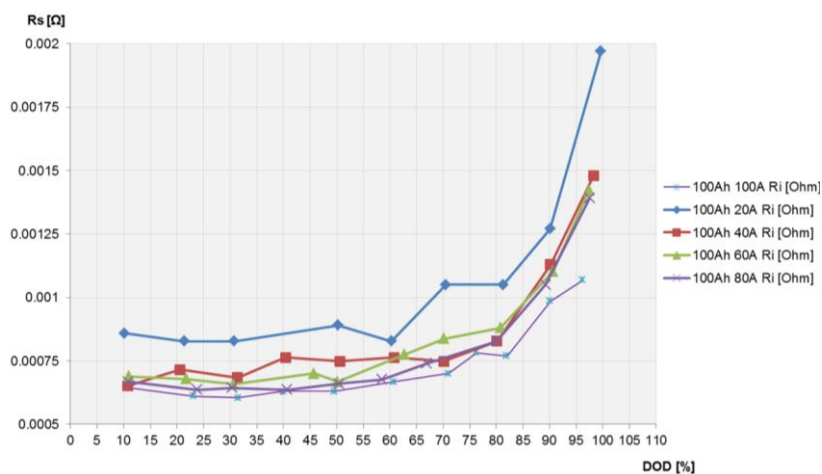
Obrázek 35 - Vybíjecí charakteristika LFP 100Ah 0stC



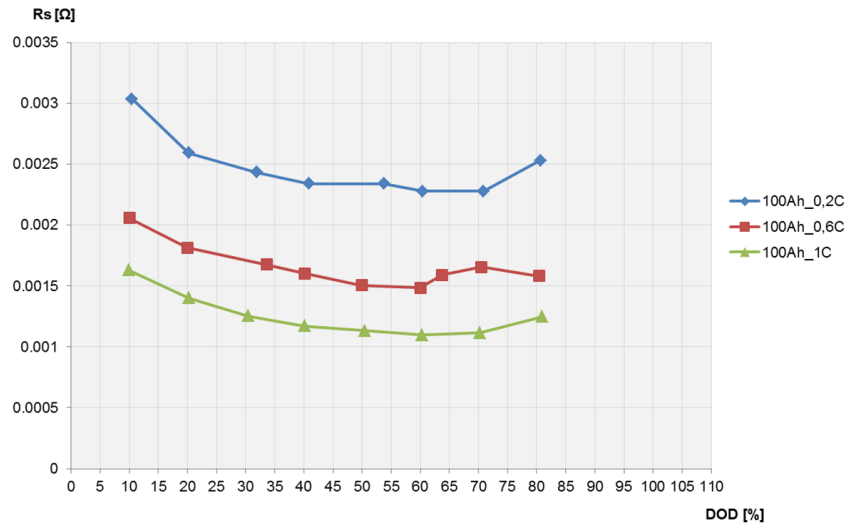
Obrázek 36 - Vybíjecí charakteristika LFP 100Ah 40stC

Na obrázcích 34, 35, 36 jsou znázorněny vybíjecí charakteristiky článku LFP 100Ah pro různé hodnoty vybíjecího proudu a pro různé teploty. Měření bylo ukončeno při dosažení dolní limitní hranice svorkového napětí článku 2,5V. Z průběhů jsou zřejmé typické vlastnosti LFP článků. Při vybíjení z plně nabitého stavu napětí nejprve strmě klesá. Ve střední, nejširší, části kapacity článku, tedy v pracovní oblasti, se napětí mění velmi málo. Až při dosažení velké hloubky vybití DOD, nad 90%, kde by již článek neměl být běžně provozován, napětí začne strmě klesat. Charakteristiky se pro jednotlivé proudy neliší tak výrazně, což je dáno nízkou hodnotou odebíraného proudu vůči kapacitě. Díky charakteru závislosti v okolí DOD 0% a při velké hloubce vybití lze z hodnoty napětí článku snadno indikovat blízkost stavu plného nabití a blízkost stavu plného vybití.

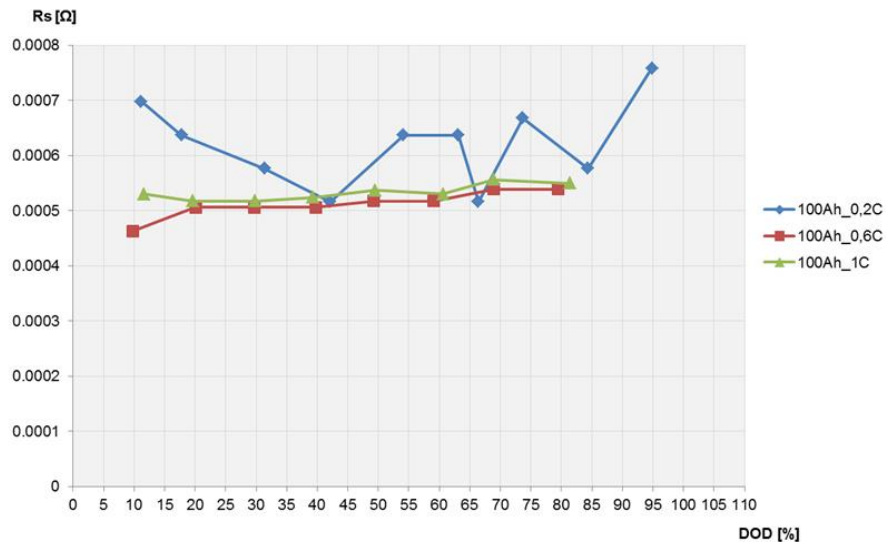
Z charakteristik je patrný i vliv teploty na využitelnou kapacitu. Z charakteristik vyplývá, že při pokojové teplotě 25°C lze z článku LFP 100Ah získat při vybíjecím proudu až 100% jmenovité kapacity. Při nízké teplotě 0°C maximálně pouze do 92% jmenovité kapacity a v případě vybíjení při teplotě 40 °C maximálně 97% kapacity. Z uvedeného porovnání lze charakterizovat ideální podmínky pro provoz při teplotě v blízké oblasti kolem 25°C.



Obrázek 37 - Závislost sériového odporu Rs na DOD LFP 100Ah 25stC



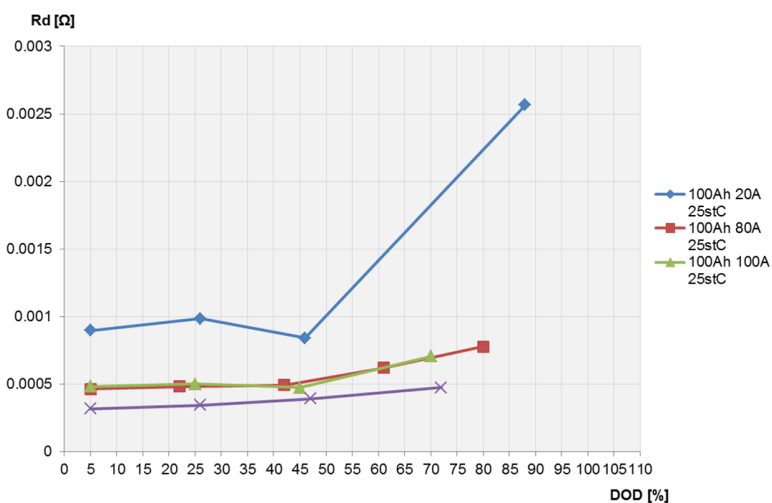
Obrázek 38- Závislost vnitřního odporu  $R_s$  na DOD LFP 100Ah 0stC



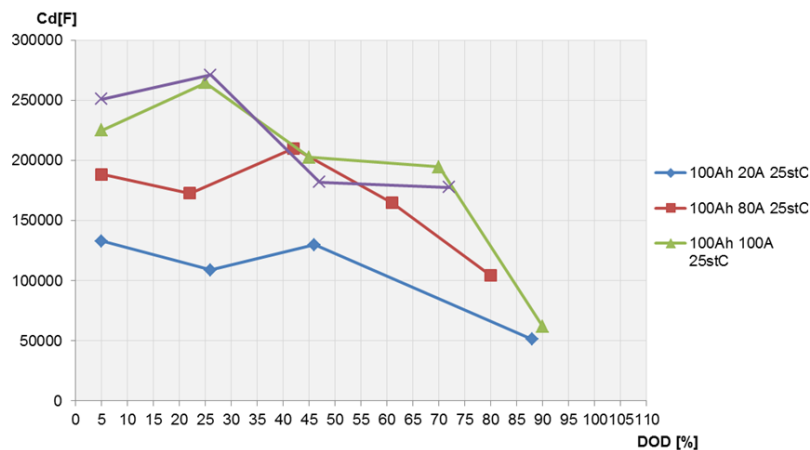
Obrázek 39 - Závislost sériového odporu  $R_s$  na DOD LFP 100Ah 40stC

Obrázky 37, 38 a 39 ilustrují závislost sériového odporu  $R_s$  v závislosti na teplotě a vybíjecím proudu. V případě teploty 25°C vykazuje charakteristika rostoucí charakter, přičemž vliv DOD je veliký. Hodnota vnitřního odporu přibližně do 80% DOD roste s nižší směrnicí než nad 80%. Z tohoto plyne fakt, že provoz článku nad 80% DOD přispívá ke snížení účinnosti provozu a k vyššímu zahřívání článku. V případě teploty článku 0°C dochází k jevu, kdy vnitřní odpor  $R_s$  vzrůstá přibližně na dvojnásobek hodnoty v porovnání s pracovní teplotou 25°C. Pracovní teplota 40°C ovlivňuje vnitřní odpor pozitivně, přičemž dochází k jeho snížení o přibližně 10-20%.

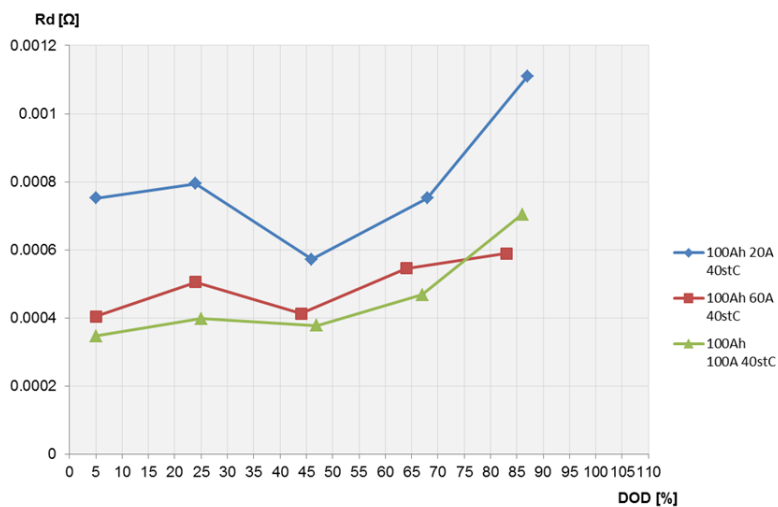
- **Měření na článku LFP 100Ah – Dynamická měření**



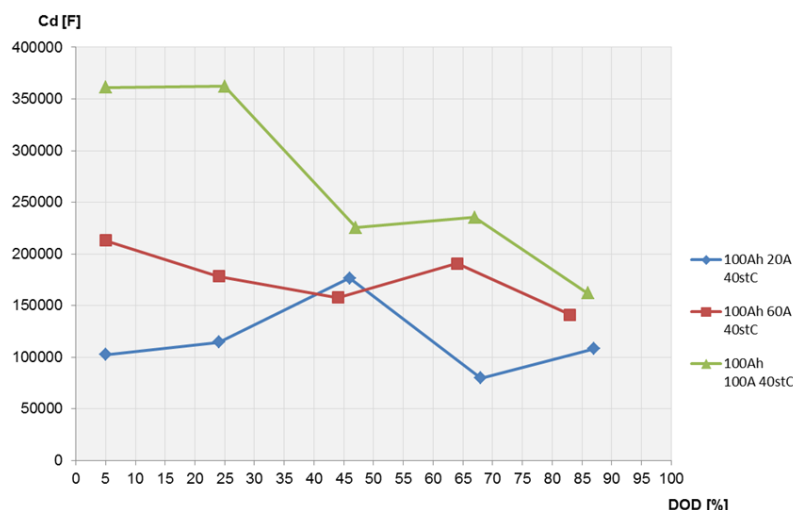
Obrázek 40 - Závislost dynamického odporu  $R_d$  na DOD LFP 100Ah 25stC



Obrázek 41 - Závislost dynamické kapacity  $C_d$  na DOD LFP 100Ah 25stC



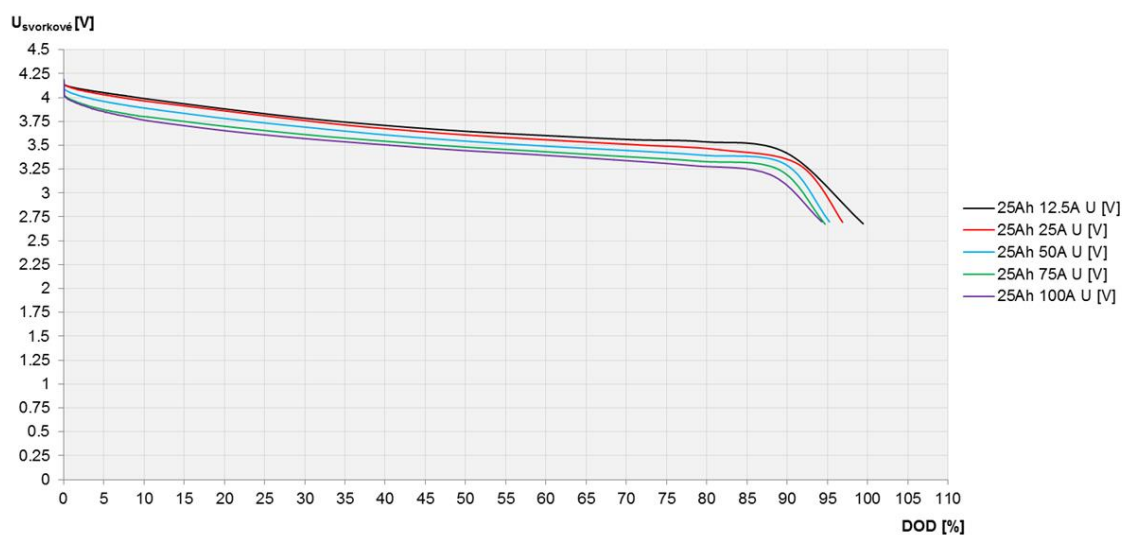
Obrázek 42 - Závislost dynamického odporu  $R_d$  na DOD LFP 100Ah 40stC



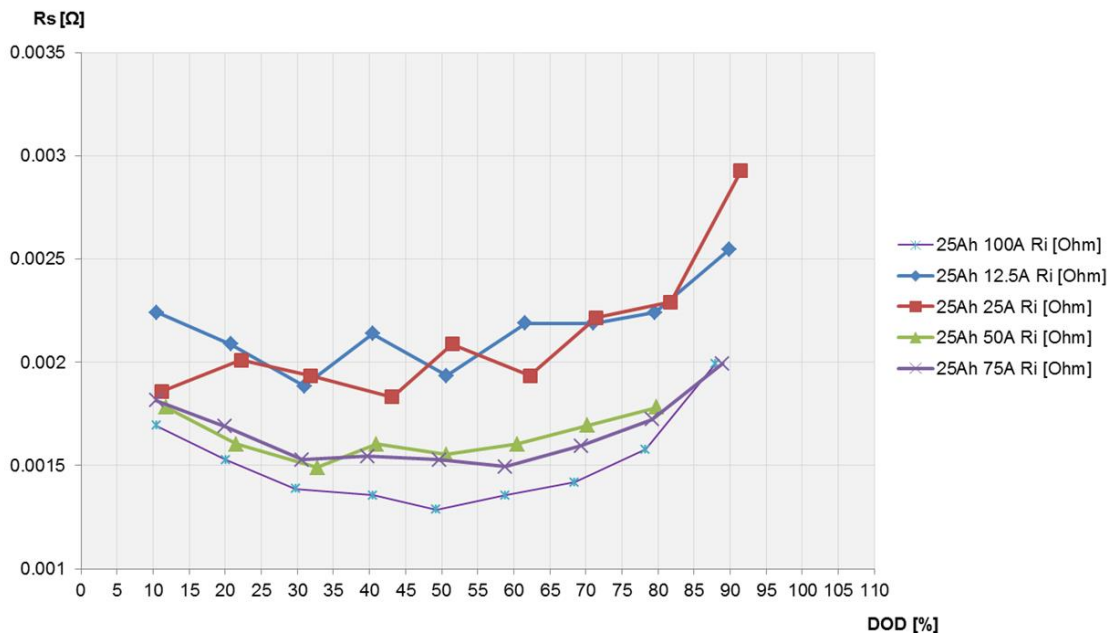
Obrázek 43 - Závislost dynamické kapacity  $C_d$  na DOD LFP 100Ah 40stC

Obrázky 40, 41, 42 a 43 ilustrují grafické závislosti dynamického odporu  $R_d$  a dynamické kapacity  $C_d$  na DOD a vybíjecím proudem. Dynamický odpor vykazuje podobný charakter jako sériový odpor  $R_s$ , tedy charakter stoupající. Opět platí, že vliv teploty je nezanedbatelný. V případě zvyšující se teploty dochází ke snížení vnitřního dynamického odporu o přibližně 10-20% v závislosti na odebíraném proudem. Dynamická kapacita vykazuje klesavý charakter v závislosti na DOD a stoupající v závislosti na vybíjecím proudem.

- **Měření na článku Li-pol SLPB 25Ah – Statické charakteristiky**



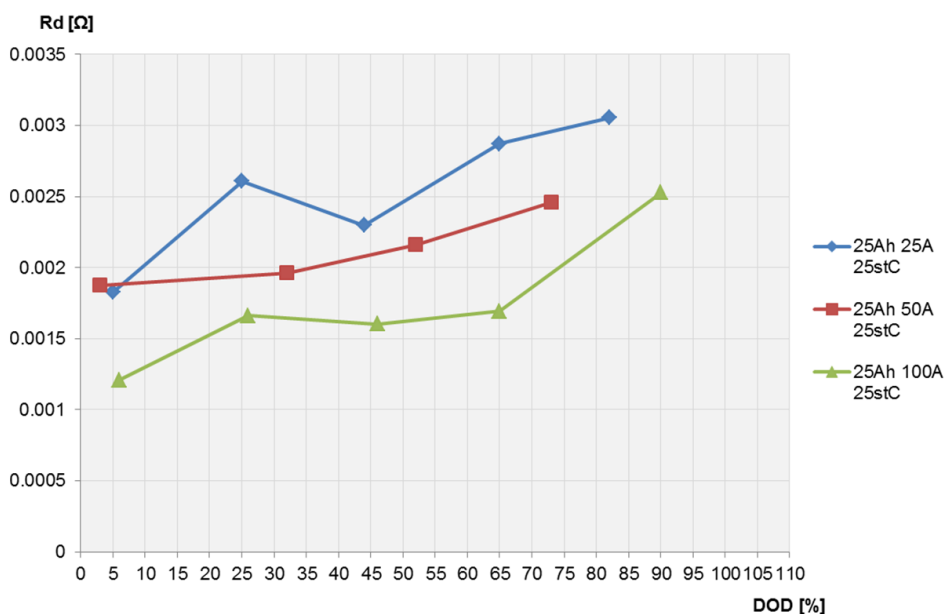
Obrázek 44 - Vybíjecí charakteristiky 25Ah 25stC



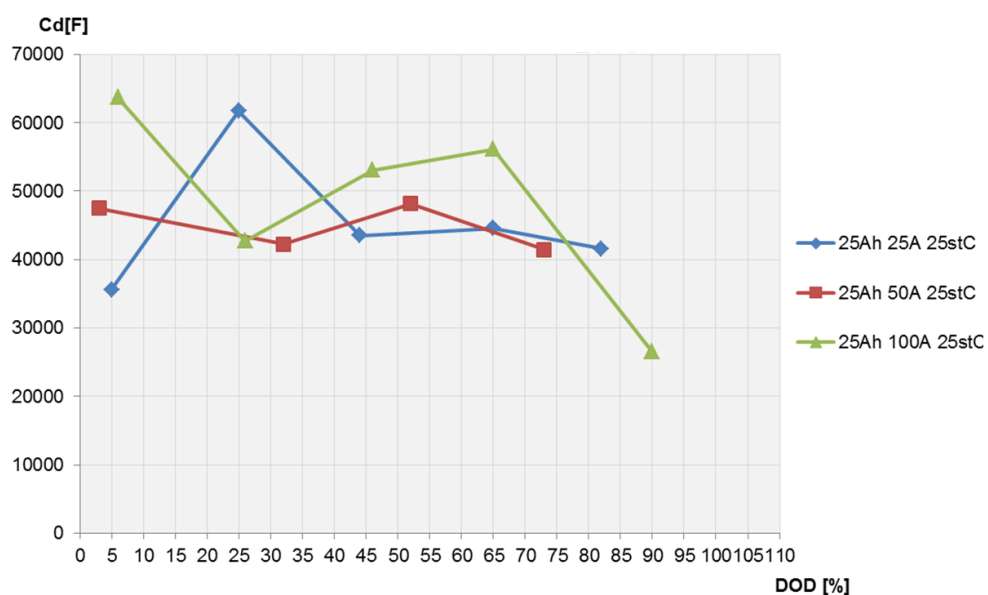
Obrázek 45 - Závislost sériového odporu  $R_s$  na DOD Li-pol 25Ah

Vybíjecí charakteristiky pro článek typu Li-pol vykazují v porovnání s LFP mírné odlišnosti. Hlavní odlišností je velikost napěťového pracovního rozsahu, v němž byl článek testován. Napěťový rozsah činil 4,15 – 2,7V, přičemž jmenovitá hodnota představuje hodnotu 3,7V. Další odlišností technologie Li-pol od LFP je i to, že napěťový pokles dosahuje větší strmosti než u článku LFP, kde lze pracovní část vybíjecí charakteristiky přibližně charakterizovat konstantní funkcí. Sériový vnitřní odpor  $R_s$  vykazuje pro všechny měřené proudy kvadratický charakter. Od počátku vybíjení sériový odpor klesá až do hodnoty přibližně 50% DOD, odkud dále strmě roste až do konce vybíjecího procesu.

- **Měření na článku Li-pol SLPB 25Ah – Dynamické charakteristiky**



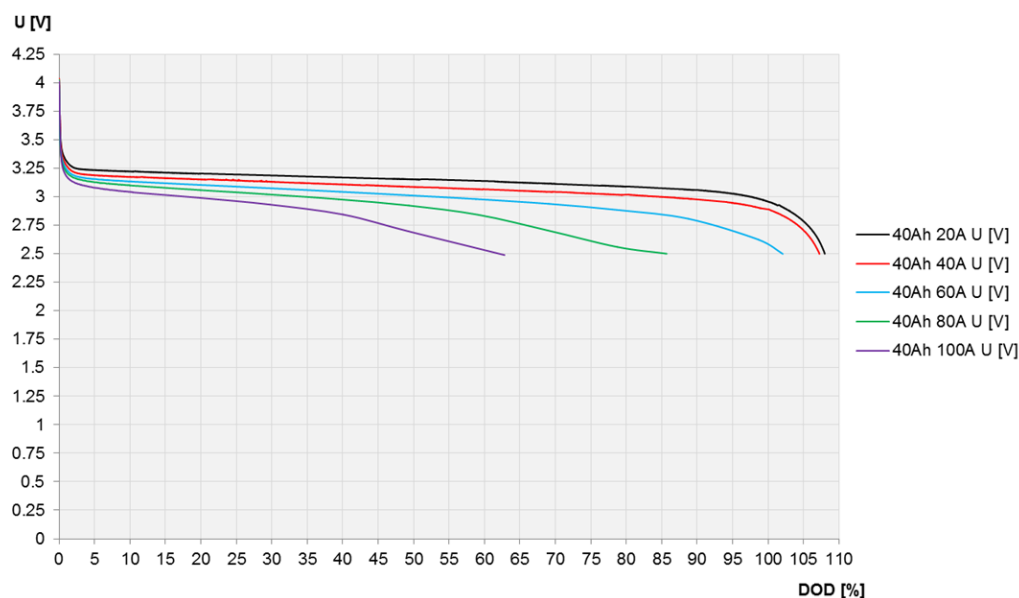
Obrázek 46 - Závislost dynamického odporu  $R_d$  na DOD - Li-pol 25Ah



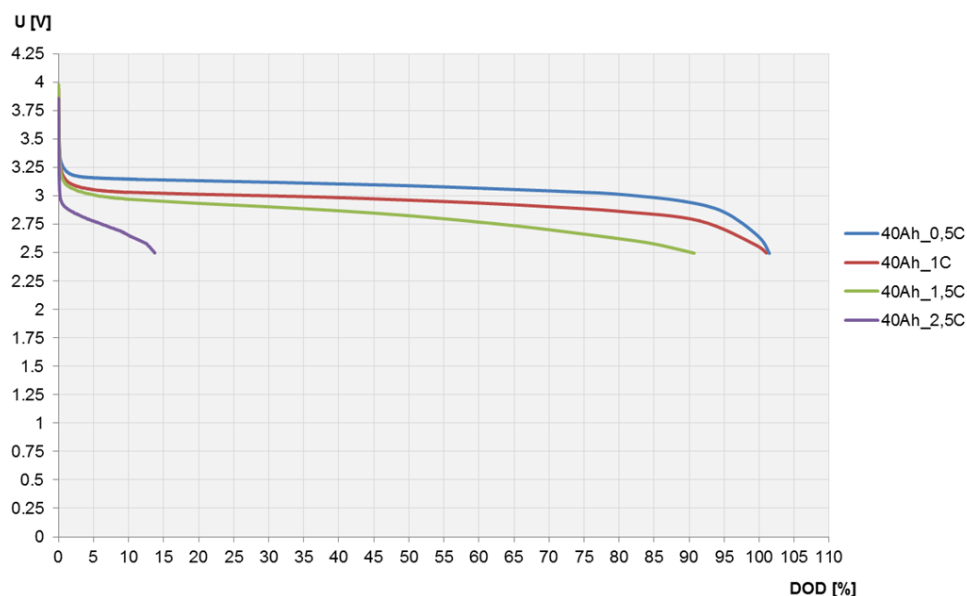
Obrázek 47 - Závislost dynamické kapacity  $C_d$  na DOD Li-pol 25Ah 25stC

Dynamické charakteristiky uvedené na obrázcích 46 a 47 připomínají svým trendem charakteristiky článku LFP 100Ah. Dynamický odpor  $R_d$  v závislosti na DOD roste prakticky lineárně, přičemž závislost na vybíjecím proudu je evidentní. Čím větší je odebíraný proud, tím více se zahřívá vnitřní struktura článku a tím klesne dynamická složka odporu. Dynamická kapacita má tendenci klesající, přičemž závislost na odebíraném proudu není jednoznačná.

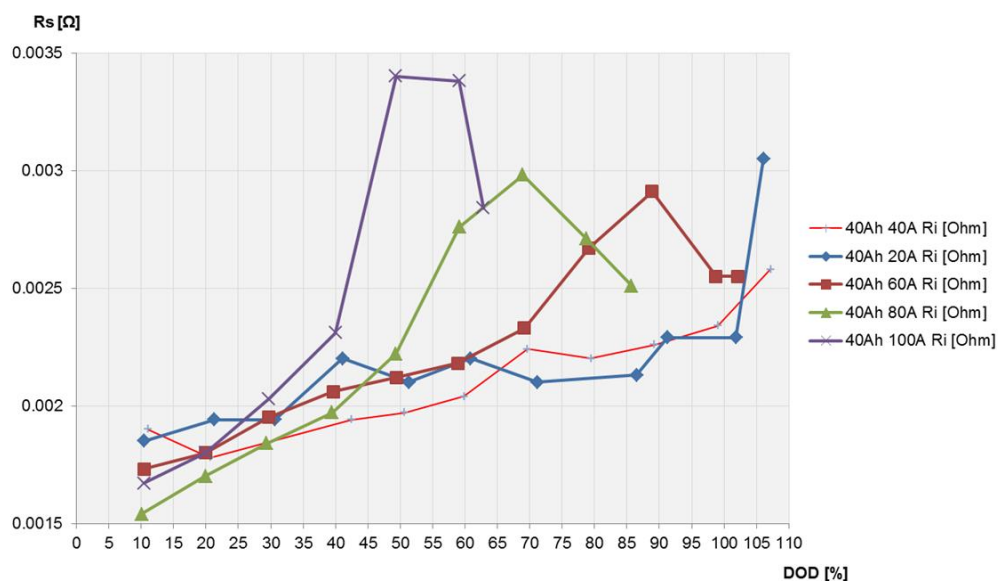
- **Měření na článku LFP 40Ah – Statické charakteristiky**



Obrázek 48 - Vybíjecí charakteristiky LFP 40Ah 25stC



Obrázek 49 - Vybíjecí charakteristiky LFP 40Ah 0stC



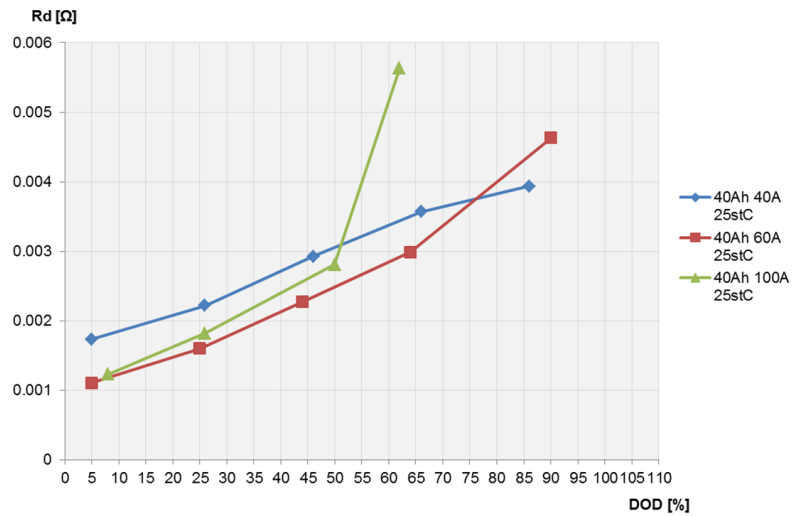
Obrázek 50 - Závislost vnitřního odporu  $R_s$  na DOD LFP 40Ah 25stC

Statické charakteristiky článku LFP 40Ah, jež jsou popsány v obrázcích výše, doplňují statické měření článků LFP 100Ah. Jelikož články LFP 40Ah dosahují menší kapacity, lze navodit vybíjecí podmínky tak, aby bylo dosaženo takřka maximálního trvalého vybíjecího proudu, tedy 3C. Pro vybíjecí proudy do 1C se článek 40Ah chová obdobně jako 100Ah článek, využitelná energie dosahuje pro tyto případy i více než 100% jmenovité kapacity. V případě vybíjecího proudu nad 1C lze pozorovat rapidní pokles kapacity až na přibližně 63% v případě 25°C, pro případ teploty 0°C dosahuje využitelná energie článku pouhých méně než 15%. Sériový vnitřní odpor  $R_s$  článku LFP 40Ah opět do hodnoty 1C svým charakterem připomíná článek LFP 100Ah. Nad hodnotami vybíjecího proudu 1C dochází k jevu, kdy se nejprve ohřejí kovové svorky článku, což rapidně zvýší okamžitou hodnotu

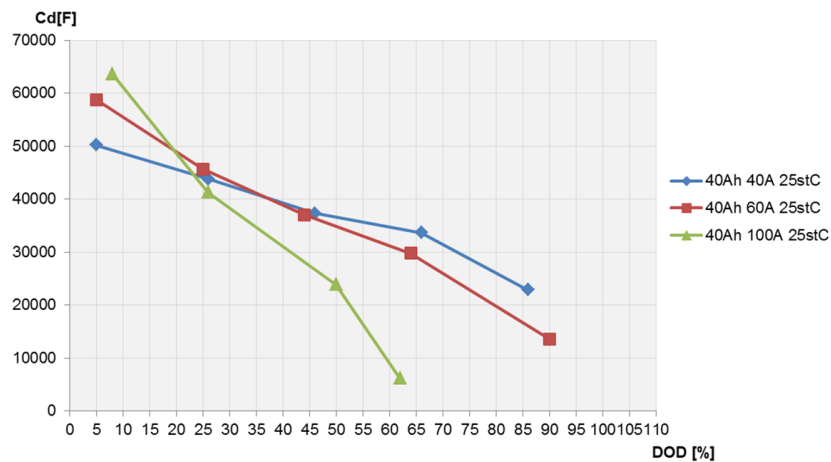


odporu. Teplo ze svorek postupně prostupuje do článku, kde ohřátí vnitřní struktury způsobí naopak snížení odporu  $R_s$ . Výsledkem tohoto procesu jsou tvary charakteristik z obrázku 50.

- **Měření na článku LFP 40Ah – Dynamické charakteristiky**



Obrázek 51 Závislost dynamického odporu  $R_d$  na DOD LFP 40Ah 25stC



Obrázek 52 - Závislost dynamické kapacity  $C_d$  na DOD LFP 40Ah 25stC

Charakter dynamických parametrů vykazuje v případě dynamického odporu rostoucí tendenci a v případě dynamické kapacity klesající tendenci. Závislost na vybíjecím proudu není plně jednoznačná.

- **Zhodnocení výsledků**

Výše uvedená stať obsahuje přehled vybraných statických a dynamických charakteristik měřených článků. Zhodnocení výsledků představuje souhrn kvalitativních trendů, jenž je možno na základě charakteristik definovat.

- Vybíjecí charakteristiky článků LFP vykazují menší směrnici v porovnání s technologií Li-pol
- Přibližně 90% kapacity článku obou technologií se nachází v lineární oblasti vybíjecí charakteristiky

- Zvýšený odebíraný proud snižuje využitelnou kapacitu článku vlivem vyšších ztrát na vnitřním odporu a vlivem snížení jeho svorkového napětí o napěťový úbytek na vnitřním odporu
- Snížená pracovní teplota snižuje využitelnou kapacitu článku až na pouhých 15%
- Sériový vnitřní odpor a dynamický vnitřní odpor se snižující se teplotou roste
- Sériový vnitřní odpor a dynamický vnitřní odpor roste s vybitím
- Dynamická kapacita s vybitím klesá

Během měření jednotlivých statických charakteristik probíhalo i měření koncové teploty článku, přičemž okolní teplota článku byla temperována na konstantní hodnotu 0°C, 25°C a 40°C. Tímto stylem lze simulovat chování v aplikaci bez dodatečného teplotního managementu. Jednotlivé hodnoty sumarizuje následující tabulka:

Výchozí teplota článku	LFP 40Ah		LFP 100Ah		Li-pol 25Ah	
	I [A]	T [°C]	I [A]	T [°C]	I [A]	T [°C]
25°C	0,5	34	0,2	30,4	0,5	30
	1	38,5	0,4	32,5	1	32,3
	1,5	43,5	0,6	35,4	2	38
	2	45,1	0,8	26,8	3	44,5
	2,5	46,3	1	37,7	4	49,6
			1,5	44		
			2	46		
40C	0,5	48	0,2	45	0,5	
	1	50,8	0,6	49	2	51,5
	2,5	62,3	1	50,5	4	57,8
0°C	0,5	14,5	0,2	14,4	0,5	24,9
	1	25	0,6	19,5	1	26,5
	1,5	34	1	25,4	2	29
	2,5	39			4	38

Tabulka 3 - Sumarizace koncových teplot měřených článků

Z tabulky 3 je patrné, že velikost proudového odběru má přímý vliv na oteplení článku. Předchozí kapitola sumarizuje vliv teploty na vnitřní odpor článku. Při čímž nižší teplotě je článek provozován, tím větší vykazuje vnitřní odpor a tudíž i ztráty. Tento fakt dokazuje tabulka, kde například pro článek technologie LFP při výchozí teplotě 25°C a vybijícím proudem 2,5C činí oteplení 21,3°C. V případě stejného odebíraného proudu a teplotě 0°C činí oteplení 39°C. Tento fakt lze shledat i u dalších článků.

Z tabulky vyplývá nutnost teplotního managementu u většiny akumulátorových aplikací, kde dochází ke změnám okolní teploty prostředí. V případě aplikace článku do chladné aplikace dochází ke zvýšení vnitřního odporu a ke snížení kapacity článku. Akumulátorová baterie nebude zdaleka vykazovat parametry, na které byla navržena (ovšem pokud již

s nízkou teplotou nebylo počítáno). V případě aplikace s vysokou okolní teplotou dochází k hazardním stavům ve smyslu bezpečnosti a snížené životnosti. LFP 40Ah článek vybíjený proudem o velikosti 2,5C vykazoval při okolní teplotě 40°C teplotu povrchu až 62,3°C, přičemž pokud by byl článek vystavován takovéto teplotě pravidelně, životnost by toto znamenalo výraznou měrou. Typickou aplikací článku, kde by mohlo dojít k nadměrnému zvýšení teploty, je jakékoli vozidlo vystavené slunečnímu záření. Pod rozpálenou kapotou vozidla není problematické dosáhnout i teplot okolo 50°C. Význam klimatizace a topení je pro aplikaci akumulátorové baterie zásadní.

### 3.3 Experimentální testy na vozidle

#### 3.3.1 Popis experimentálního vozidla

V rámci projektu TAČR s názvem Výzkum jízdních vlastností a řízení pohonů trakčních kolejových vozidel s nezávisle otáčivými koly, bylo v roce 2013 na půdě Dopravní fakulty Jana Pernera postaveno experimentální kolejové vozidlo. Toto vozidlo patří do skupiny vozidel čistě elektrických s akumulátorovým napájením. Kromě základního výzkumného projektu, který skončil v roce 2014, je vozidlo velice vhodné právě pro reálné testování akumulátorového systému a validaci simulačního modelu akumulátorového systému.

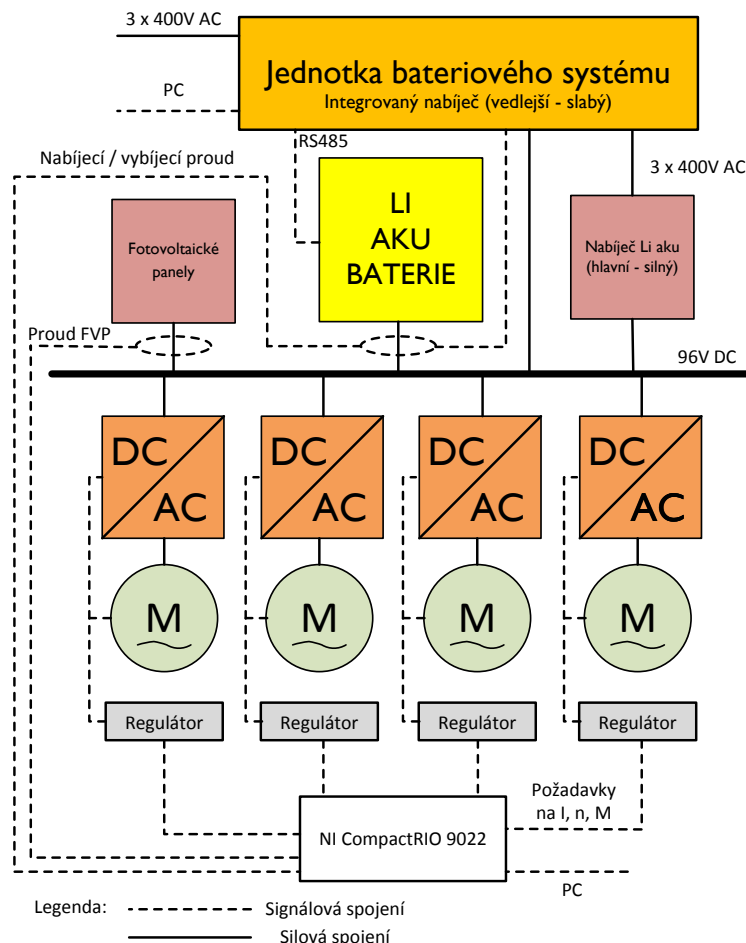


Obrázek 53 - Ilustrační fotografie experimentálního kolejového vozidla

Hmotnost vozidla činí 2140kg (verze před konstrukčními úpravami), přičemž o její rozložení na koleje se starají tři nápravy (dvě hnané a jedna běžná). Pohon tvoří čtyři nezávislé trakční motory (synchronní s permanentními magnety), obhospodařující vždy jedno kolo, napájené ze čtyř trakčních měničů. Řízení trakčních měničů zajišťuje čtveřice digitálně signálových procesorů – regulátorů. Tyto mají krom řízení pohonu též za úkol měření proudů motorů a jejich úhlového natočení. Celý pohonný systém je zastřešen nadřazeným řídicím systémem CompactRIO 9022 od výrobce National Instruments. Úkolem nadřazeného systému je řízení čtveřice regulátorů a snímání měřených dat včetně jejich zpracování. Celkový výkon motorů je 4 x 1,25kW s možností krátkodobého přetížení až na 150%. Zásobárnu elektrické energie tvořil donedávna akumulátor olověný, který byl sestaven ze sériové kombinace osmi akumulátorů se jmenovitým napětím 12V a kapacitou 150Ah.

Současná podoba zdrojového systému spočívá v zásadní změně – z důvodů výzkumu moderních akumulátorových systémů vozidlo pohání systém založený na Li článcích a sada fotovoltaických panelů, přičemž veškeré úpravy akumulátorového systému představují jeden z cílů disertační práce.

Celkové blokové schéma vozidla je uvedeno na obrázku níže.



Obrázek 54 - Blokové schéma elektrické výzbroje experimentálního kolejového vozidla

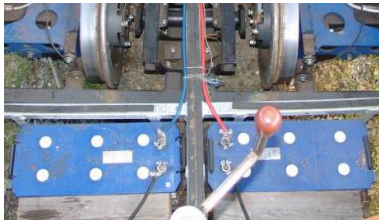

Akumulátorový systém vozidla byl ve fázi výroby a následných zkoušek provozován s olověnými trakčními akumulátory. Tato koncepce systému plně dostačovala účelu původních testů – tedy výzkumu algoritmů řízení nezávisle otáčivých kol.

Druhá série výzkumu se týká zdrojového systému. Cíle výzkumu spočívají mimo jiné i v aplikaci a testování fotovoltaických panelů bez přizpůsobovacího měniče. Dalším cílem je celková restrukturalizace akumulátorového systému za účelem reálných měření a následného upravení dat pro dříve popsané validační simulační modely. Další benefit svépomocné úpravy akumulátorového systému spočívá ve fyzickém kontaktu se zařízením – celý systém tvoří vyrobené či zakoupené komponenty, které jsou zapojeny v poměrně složitý celek. Žádná z prací na akumulátorovém systému nebyla zadána externí firmě.

Cílem úpravy bylo:

- Odstranění veškeré Pb technologie z vozidla
- Výroba akumulátorových packů – boxy, v nichž jsou umístěné jednotlivé články
- Výroba hlavní jednotky Li bateriového systému
- Celkové nastavení a oživení
- Implementace na vozidlo a zprovoznění

Následující porovnání naznačuje skvělé předpoklady pro výrazné snížení hmotnosti vozidla a celkové kladné vlastnosti Li akumulátorů. Pro účely úpravy systému byla zvolena Li technologie LFP – vzhledem k bezpečnosti, vhodným parametrům a dostupnosti.

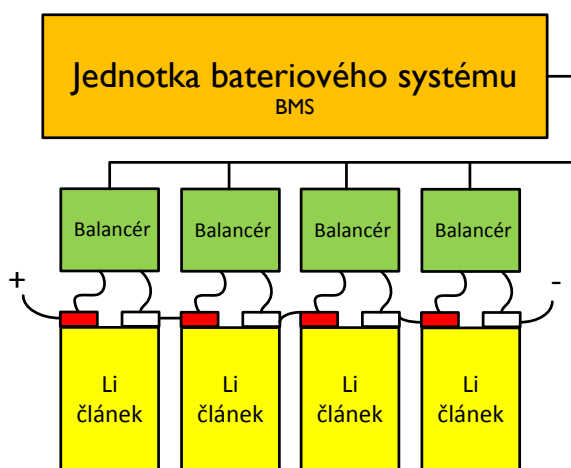
Parametr	Varianta s Pb aku	Nová varianta s Li aku
Typ článku	EXIDE FT 12 150	Sinopoly SP-LFP100AHA
Jmenovité napětí [V]	12	3,2
Počet kusů v sérii [ks]	8	30
Celková energie [kWh]	14,4	9,6
Hmotnost jednoho článku [kg]	53	3,3
Celková hmotnost článků [kg]	424	99
Celková hmotnost včetně příslušenství <sup>2</sup> [kg]	424	150
Hmotnostní hustota energie [Wh/kg]	34	64
Ilustrační fotografie		

<sup>2</sup> Příslušenství představuje instalační boxy a dodatečné zařízení - například jednotka bateriového managementu

### 3.3.2 Popis akumulátorového systému

Nadřazená jednotka BMS – battery management system - představuje hlavní logický celek, který plní funkci dozorčí, řídicí a měřicí – tvoří tedy podstatnou část odlišností v porovnání s původním akumulátorovým systémem a bázi Pb článků. Články založené na lithiu vyžadují několikanásobně vyšší úroveň monitoringu než technologie Pb.

Typický BMS systém se většinou skládá z hlavní jednotky (je možno se setkat s označením MASTER) a podružných externích obvodů, tzv. balancérů. Balancery představují zařízení, jež jsou připojena přímo ke svorkám každého článku a starají se jak o měření provozních veličin (napětí a teplota článku), tak o vyrovnávání napětí jednotlivých článků v baterii. Jejich funkce je v akumulátorovém systému nezastupitelná a nelze Li články bez těchto obvodů provozovat. Hlavní jednotka vyhodnocuje informace přijaté jednotlivými balancery, většinou je ukládá a přikazuje jednotlivým balancérům druh činnosti – vyčkávání či nějaký z druhu akčního zásahu do nabíjecího procesu.



Obrázek 55 - Blokové zapojení BMS systému

Na trhu s Li akumulátorovým vybavením se lze setkat s různou úrovní BMS systémů – od nejjednodušších plně analogových až po důmyslné sestavy s rychlými procesory a objemnými datovými úložišti pro měřená data.

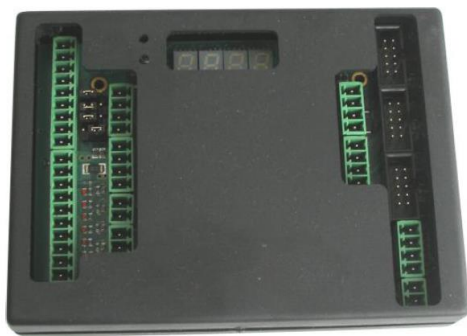
V případě akumulátorového systému experimentálního kolejového vozidla bylo nutno stanovit rozhodující kritéria pro volbu vhodného systému BMS:

- Možnost zapojení až 30 balancérů
- Možnost úpravy počtu využitých článků pro možnost úpravy jmenovitého napětí akumulátorové baterie pro optimalizaci využití fotovoltaických panelů
- Možnost logování dat v reálném čase
- Vysoký stupeň možností parametrizace
- Balancovací proud alespoň 2A
- Nákupní a cenová dostupnost

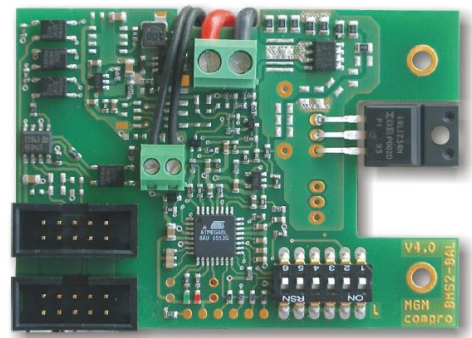
Po postupném procházení trhu padla volba na BMS systém od tuzemské firmy MGM Compro [17], sídlící ve Zlíně. Dodávaný systém vyhověl všem z uvedených parametrů.

System se skládá z:

- Hlavní jednotky MGM Compro BMS 2 MAST-64,
- 29 ks balancérů s možností balancovacího proudu až 5A – BMS-2-5A BAL,
- 1 ks balancéru se zakončovacím R pro datovou komunikaci BMS-2-5A ZR,
- 1 ks proudové hallové sondy 400A – HALL 400B/SC,
- ostatní materiál – teplotní čidla, vodiče, galvanické oddělení pro USB, apod.

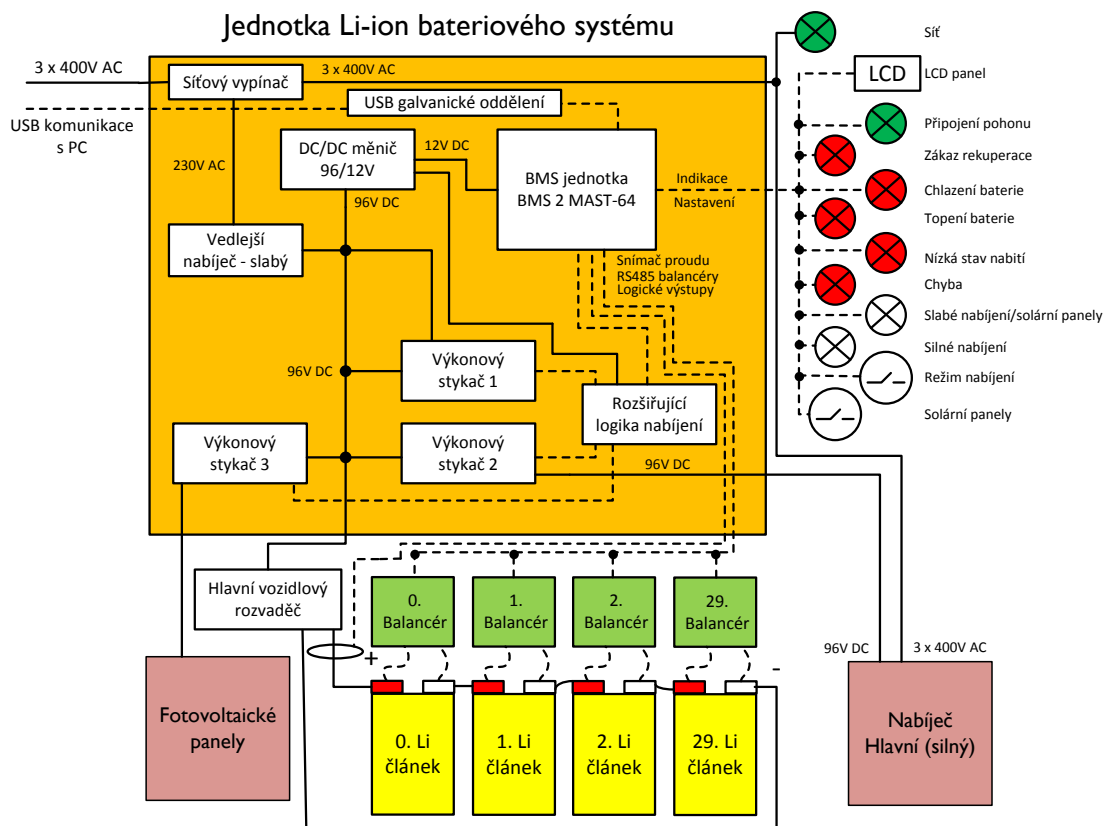


Obrázek 56 - MGM Compro hlavní jednotka[2]



Obrázek 57 - MGM Compro balancér [2]

Blokové schéma vozidla uvedené výše popisuje celkovou koncepci vozidla, včetně bateriového systému. Ovšem, blokové schéma není v ohledu na bateriový systém přesné a tudíž je nutno provést detailnější, opět jednopólové, schematické znázornění s podrobnějšími informacemi.



Obrázek 58 - Podrobné blokové jednopólové schéma bateriového systému vozidla

Obrázek 58 popisuje konkrétní situaci na vozidle. Pro jednoduchost není ve schématu uvažováno žádné jištění, v reálné aplikaci je jištění provedeno dostatečně dle příslušných potřeb – stejnosměrné jističe pro DC výkonové okruhy, trubičkové pojistky pro méně namáhané DC okruhy a větve se síťovým napětím 230V AC. Bateriový systém lze tímto rozdělit do několika zásadních celků:

- Jednotka Li-ion bateriového systému
- Akumulátorová baterie
- Nabíječ
- Fotovoltaické panely

Hlavní silový přívod elektrické energie je přiveden do rozvaděče s názvem Jednotka Li-ion bateriového systému. Za přívodkou následuje hlavní síťový vypínač, odkud je síťové napětí vedeno jak do hlavního silného nabíječe (3 x 400V 50Hz), tak do vedlejšího slabého nabíječe (230V 50Hz). O přítomnosti síťového napětí informuje indikační kontrolka s názvem „Sít“. Hlavním mozkem rozvaděče je jednotka BMS 2 MAST-64, jenž řídí celý systém. BMS jednotka též dokáže komunikovat s PC po rozhraní USB, kde je možno jak celý systém parametrizovat, tak logovat data v reálném čase. Napájení BMS jednotky zabezpečuje DC/DC měnič 96V/12V DC, přičemž pro funkci systému musí být připojeny akumulátory, nelze jej provozovat pouze se síťovým napájením. Snižující měnič též napájí blok s názvem Rozšiřující logika nabíjení, kde dochází k logické reléové úpravě výstupních signálů tak, aby bylo možno systém provozovat v různých režimech ve spojitosti se solárními panely. V tomto bloku se též



nacházejí upravené budící obvody pro spínání výkonových stykačů, neboť jejich cívky nesou trvalé napájení jmenovitým napětím. V rozvaděči se tedy nacházejí tři výkonové stykače, které spínají zvolenou kombinací nabíjecích elementů – je možno nabíjet hlavním nabíječem, vedlejším nabíječem, fotovoltaickými panely či různými kombinacemi. Důležitými vstupy rozvaděče je hlavní silový přívod 96V DC, komunikace s balancéry a výstup na indikační/nastavovací prvky.

Význam jednotlivých prvků ovládacího panelu:

- Síť – indikace přítomnosti síťového napětí za síťovým vypínačem
- LCD panel – informuje uživatele o zbývající kapacitě baterie [%]
- Připojení pohonu – svolení k jízdě
- Zákaz rekuperace – aktivuje se v případě, kdy je baterie plně nabitá a rekuperovanou energii by dále nepojmula
- Chlazení baterie – baterie je přehřátá, je nutno aktivovat chlazení
- Topení baterie – baterie je podchlazená, je nutno aktivovat její topení
- Nízký stav nabití – kritický stav zbývající kapacity baterie
- Chyba – chyba v systému, nutný servisní zásah
- Slabé nabíjení / solární panely – aktivováno nabíjení slabou nabíječkou či solárními panely
- Silné nabíjení – aktivováno silné nabíjení
- Režim nabíjení – volba režimu nabíjení
  - Auto – nabíjecí systém se nachází v automatickém režimu. Tento režim je charakterizován posloupným spínáním nabíječů. Pokud je baterie vybitá, je nejdříve aktivováno silné nabíjení nabíjecím proudem 25A. Silné nabíjení je aktivováno až do chvíle, kdy je dosaženo maximálního napětí některého z článků. V této chvíli tento článek začne balancovat a limitovat napětí článku. Aby nedošlo k přetížení balancéru vysokým nabíjecím proudem, systém automaticky přepne do režimu slabého nabíjení – aktivuje se tedy slabý nabíječ, umístěný v Jednotce Li-ion bateriového systému. Oba nabíječe pracují v režimu IU – tedy konstantní proud a konstantní napětí. Nabíjecí proud slabého nabíječe činí 2A. Po dosažení maximálního napětí na článek u všech elementárních článků je nabíjení ukončeno odpojením všech nabíječů. Tyto jsou automaticky aktivovány v případě poklesu napětí baterie na určitou mez – tento režim se nazývá jako tzv. udržovací.
  - 0 – v režimu 0 je blokován silný nabíječ a slabý nabíječ se solárními panely se nachází v automatickém režimu.

- Man / Solár – tento režim slouží k nucenému sepnutí slabého nabíječe a případně solárních panelů bez ohledu na stav automatiky.
- Solární panely – přepínač slouží k volbě zapojení solárních panelů do nabíjecího procesu.

Postup aktivace systému je následující:

#### **Pro režim jízdy:**

- Aktivace DC 96V sběrnice do Jednotky Li-ion bateriového systému
- Následuje automatická kontrola funkčnosti balancérů
- V případě nezjištění žádných poruch - rozsvícení kontrolky „Připojení pohonu“
- V případě přepnutí přepínače „Režim nabíjení“ do polohy 0 či Man / Solár a přepínač do polohy 1, lze během jízdy dobít akumulátorovou baterii ze solárních panelů. Toto je velice vhodné pro energetická měření.
- O poruchách či abnormálních stavech obsluhu informují výše popsané kontrolky

#### **Pro režim nabíjení:**

- Aktivace DC 96V sběrnice do Jednotky Li-ion bateriového systému
- Volba režimu nabíjení
- Volba sepnutí solárních panelů
- Sepnutí síťového vypínače
- Následuje automatická kontrola funkčnosti balancérů
- Během provozu může obsluha měnit režimy nabíjení
- Praktické využití nabíjecích režimů a režimu solárních panelů je popsáno níže: (RN- režim nabíjení, SP- solární panely, SV – síťový vypínač)
  - **RN- Auto, SP- 0, SV- 1:** systém pracuje v plně automatizovaném režimu, energie pro nabíjení je získávána pouze ze sítě, obsluha nemusí být při nabíjení přítomna. Aktivován je pouze silný a slabý nabíječ. Toto nastavení představuje typickou bezpečnou variantu nabíjení.
  - **RN- Auto, SP- 1, SV- 1:** Systém pracuje v plně automatizovaném režimu. Rozdílem od předchozí varianty je to, že v režimu slabého nabíjení jsou spolu s nabíječem aktivovány solární panely. V tomto režimu je možno sledovat vlastnosti solárních panelů v rámci pomocného nabíjecího provozu.
  - **RN- Man / Solár, SP- 0, SV- 1:** Systém pracuje v manuálním režimu, což znamená, že slabý nabíječ je aktivován již od počátku nabíjení bez ohledu

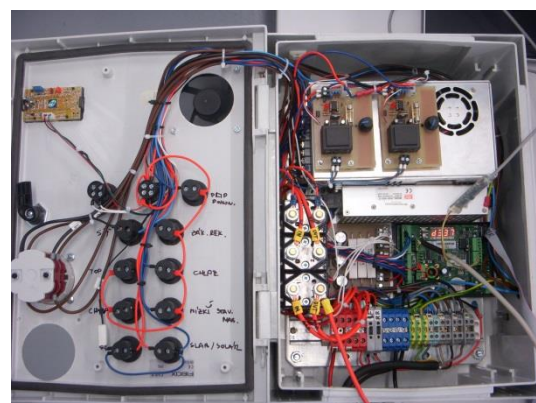
na to, zda má být momentálně aktivován silný nabíječ. Silný nabíječ se nachází v blokaci a v tomto režimu nebude nikdy spuštěn. Praktický význam režimu spočívá například v pozvolném nabíjení hluboce vybité akumulátorové baterie v případě nějaké poruchy a parazitního klidového odběru vozidla během uskladnění. Hluboce vybitá baterie by se mohla vysokým nabíjecím proudem poškodit. Další význam je v režimu plného vybalancování akumulátorové baterie – bez ohledu na automatiku je ve finální fázi nabití baterie dále nabíjena a většina energie se máří v balancérech. Tento stav je ideální pro maximální vyrovnaní napětí všech článků baterie.

- **RN- Man / Solár, SP- 1, SV- 1:** Stejná varianta jako v předchozím případě, přičemž solární panely slouží jako doplňující nabíjecí zdroj.
- **RN- Man / Solár, SP- 1, SV- 0:** Stejná varianta jako v předchozím případě, přičemž kompletní nabíjení zabezpečují pouze solární panely. Tato varianta je stěžejní pro energetická měření na solárních panelech.

Na níže uvedeném obrázku je znázorněn stav systému bezprostředně před instalací na vozidlo.



Obrázek 59 - Jednotka bateriového systému



Obrázek 60 - Detail jednotky bateriového systému

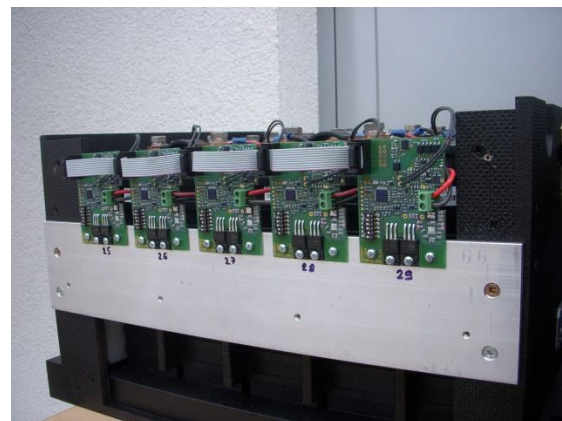
Lithiové články se od olověných neliší pouze v elektrických parametrech, ale i v mechanických. Většina olověných akumulátorů je primárně uzpůsobena tak, aby byla možná okamžitá montáž do aplikace. U Li článků je situace ztížena tím, že většina z nich nemá žádný upevňovací prvek a bezprostřední instalace do aplikace není tímto možná. Dalším ztížením situace je i nutnost instalace balancérů s přídatnými chladiči.

V rámci modernizace vozidla bylo nutno vymyslet, jakou formu akumulátorových packů zvolit a kam je na vozidlo umístit. Umístění určují ložné sektory vozidla – jedinou variantu představují prostory vzniklé odebráním původních Pb akumulátorů, v podvozkové části vozidla. Dalším úkolem byla výroba vhodných packů, jež by plnily funkci mechanické soudržnosti. Vzhledem k možnostem vozidla a symetrickému rozmístění přidané hmotnosti byly vyrobeny 3 akumulátorové packy, přičemž každý obsahuje 10 kusů Li článků. Každý z packů obsahuje jeden silový výstup a dva (popřípadě jeden) komunikační. Vše bylo konstruováno s ohledem na prostorové uspořádání a jednoduchost finální instalace. Použitými materiály se staly hliník a impregnovaná překližka. Povrchovou úpravu představuje odolný

protikorozní nástřík na gumové bázi. Každý akumulátorový pack je opatřen odnímatelnými kryty pro zvýšení ochrany IP.



Obrázek 61 - Akumulátorové packy



Obrázek 62 - Detail balancérů

### 3.3.3 Měření na akumulátorovém systému vozidla

Měření na akumulátorovém systému vozidla představuje důležitou součást ověření vhodnosti zvoleného modelu článku. Laboratorní testy článků umožňují poskytnout pouze omezený soubor měřených dat, tudíž je vhodné výsledky simulačního modelu validovat dle reálně naměřených dat právě z vozidla.

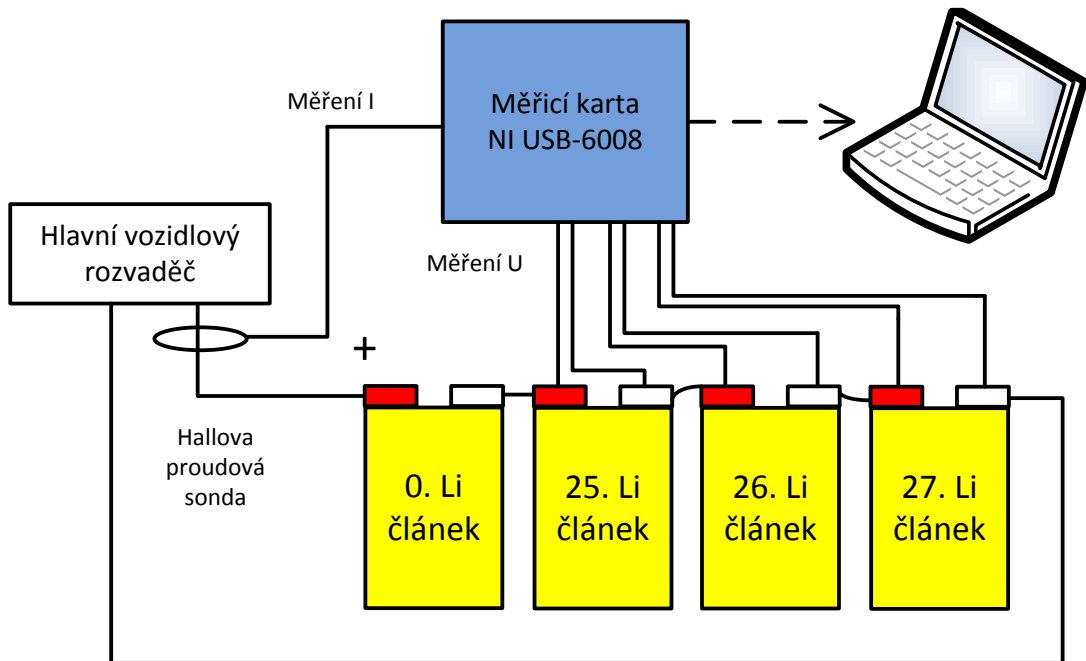
Experimentální vozidlo je vybaveno plně provozuschopným akumulátorovým systémem, jenž má integrovanou funkcionalitu logování dat. Funkce logování přímo systémem BMS byla využívána primárně ve fázi ožívování s výhledem pozdějšího využití právě ve validačních zkouškách, přičemž v sobě BMS systém integruje prvky pro snímání, zpracování a ukládání dat v reálném čase. Každá z komponent má svoji přesnost a data určitou metodiku filtrace včetně vyhodnocování. Pro případ přesné validace výsledků z laboratoře použitím dat z vozidlové BMS by mohlo dojít k situaci, že systém BMS do procesu měření zanesou určitou systematickou odchylku. Pro měření na vozidle by proto měly být zachovány měřicí podmínky shodné s laboratoří.

Cíle procesu validačních zkoušek:

- Zhodnocení, do jaké míry se shoduje simulační model článku a reálné průběhy z vozidla
- Měření a logování odebíraného proudu z akumulátorové baterie
- Měření a logování svorkových napětí vybraných článků akumulátorové baterie (konkrétně SP-LFP100AHA)

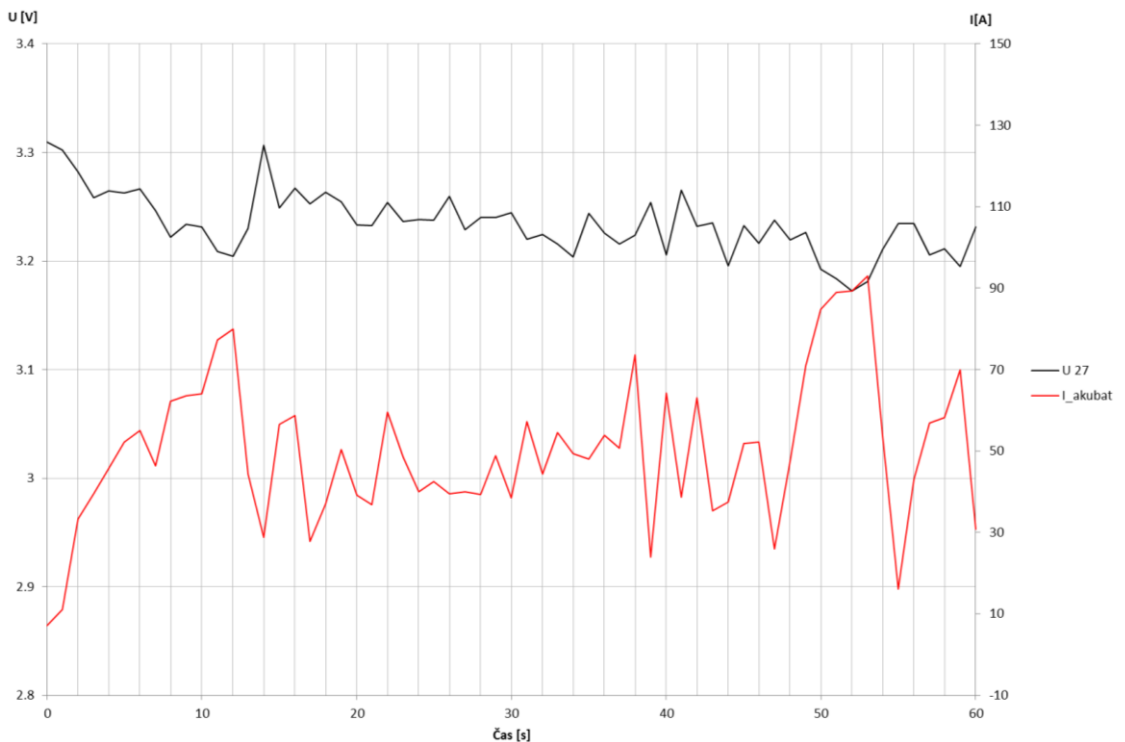
Měřicích podmínkách, přibližujících se největší měrou laboratorním, se dosáhne použitím totožného měřicího systému stávajícího se z vhodného snímače proudu, stejného elementu pro zpracování dat a stejného vyhodnocovacího software. Jelikož systém BMS nesplňuje ani jednu z možností, pro finální validace využit nebyl.

Schéma zapojení měřicího pracoviště:



Obrázek 63 - Měřicí pracoviště na experimentálním kolejovém vozidle

Obrázek 63 ilustruje zapojení měřicího pracoviště přímo na vozidle. V zapojení lze sledovat změnu oproti laboratorním podmínkám v podobě využití jiného čidla proudu. V případě laboratorního měření bylo využito snímacího rezistoru 100mV/100A, v případě měření na vozidle pak Hallovu sondy Tamura L06P400S05.



Obrázek 64 - Typické napěťové a proudové průběhy sejmuté za 1 min provozu

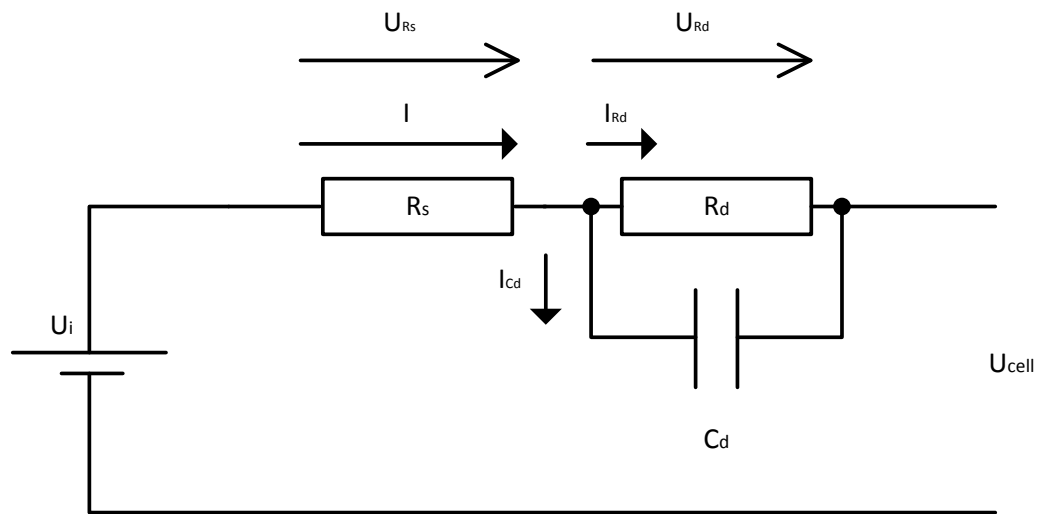
Graf na obrázku 64 znázorňuje charakter reálně měřených dat výše popsaným měřicím systémem v režimu jízdy, z něhož je patrná okamžitá odezva svorkového napětí článku v závislosti na vybíjecím proudu. Průběhy stejného charakteru s delší dobou záznamu jsou využity právě pro účely validace.

### 3.4 Simulační model článku a potřebné výpočty

Kapitola 3.1 pojednává o definování vhodné struktury modelu článku v závislosti na požadavcích simulace pro výslednou aplikaci. V kapitole byl zvolen jako nejvhodnější model elektrochemického článku jako Theveninův. Theveninův obvodový model popisuje článek pomocí čtyř základních prvků: vnitřní napětí  $U_i$  (často používaná zkratka OCV z anglického Open Circuit Voltage), sériového odporu  $R_s$ , dynamického odporu  $R_d$  a dynamické kapacity  $C_d$ . Následující kapitoly postupně popisují měřicí metody a postupy separace jednotlivých obvodových prvků tak, aby bylo možno uvedený model vhodně naparametrovat.

Simulační model pak představuje systém, který na základě určitých vstupních dat na svém výstupu generuje žádanou odezvu. V případě akumulátorového systému lze pokládat za vstupní data odebíraný proud, stupeň vybití, technologie článku, a za výstupní data pak svorkové napětí.

Obvodové schéma Theveninova modelu se znázorněním obvodových veličin vypadá následovně:



Obrázek 65- Theveninův model s vyznačenými obvodovými veličinami

V případě režimu jízdy je elektrická energie odebírána ze svorek článku. Odebíraný proud prochází přes sériový vnitřní odpor  $R_s$  a dále se dělí na proud  $I_{Rd}$  procházející dynamickým vnitřním odporem  $R_d$  a proud  $I_{Cd}$  procházející dynamickou kapacitou  $C_d$  v případě neustáleného stavu. Předmětem činnosti simulačního modelu je určení výstupního napětí  $U_{cell}$ , což představuje algoritmizaci uvedeného vztahu:

$$U_{cell} = U_i(DOD, T) - U_{R_s}(DOD, I, T) - U_{R_d}(DOD, I, T) \quad (25)$$

Přičemž  $U_i=f(\text{DOD},T)$  je zjištěna dle naměřených laboratorních dat,  $U_{R_s}$  lze vypočítat dle vzorce:

$$U_{R_s} = R_s(\text{DOD}, I, T) \cdot I \quad (26)$$

Kde  $R_s=f(\text{DOD},I,T)$  též spadá do skupiny veličin, jež byly zjištěny laboratorním měřením. Dalším prvkem modelu je RC článek, jehož neznámý parametr představuje  $U_{R_d}$ .

Pro proudy tekoucí obvodem platí:

$$I = I_{R_d} + I_{C_d} \quad (27)$$

Pokud stanovíme jako neznámou stavovou veličinu  $u_{R_d}(t)$ , lze sestavit dle I. Kirchhoffova zákona diferenciální rovnici ve tvaru:

$$\frac{u_{R_d}(t)}{R_d} + C_d \frac{\partial u_{R_d}(t)}{\partial t} = I \quad (28)$$

Po úpravě pak dostáváme:

$$u_{R_d}(t) + R_d \cdot C_d \frac{\partial u_{R_d}(t)}{\partial t} = I \cdot R_d \quad (29)$$

Obecné řešení diferenciální rovnice získáme v případě položení levé strany rovnice rovné nule.

$$u_{R_d}(t) + R_d \cdot C_d \frac{\partial u_{R_d}(t)}{\partial t} = 0 \quad (30)$$

Řešení dynamického přechodného děje na svorkách článku budeme hledat ve formě součtu obecného (řešení přechodového jevu) a partikulárního řešení (ustálený stav), tedy:

$$u_{R_d}(t) = u_{obecné}(t) + u_{partikulární} \quad (31)$$

Následně hledáme řešení homogenní rovnice jako:

$$u_{obecné}(t) = K \cdot e^{\lambda t} \quad (32)$$

Po dosazení do homogenní diferenciální rovnice (30) dostáváme vztah:

$$K \cdot e^{\lambda t} + R_d \cdot C_d \frac{\partial (K \cdot e^{\lambda t})}{\partial t} = 0 \quad (33)$$

Pro derivaci vztahu lze psát:

$$K \cdot e^{\lambda t} + R_d \cdot C_d \cdot \lambda \cdot K \cdot e^{\lambda t} = 0 \quad (34)$$

Po vhodném upravení rovnice a vyjádření neznámé lambda dostáváme:

$$\lambda = -\frac{1}{R_d \cdot C_d} \quad (35)$$

Po dosazení do vztahu (32) obecné řešení přechází do tvaru:

$$u_{obecné}(t) = K \cdot e^{\lambda \cdot t} = K \cdot e^{-\frac{t}{R_d \cdot C_d}} = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (36)$$

Tímto bylo nalezeno obecné řešení homogenní diferenciální rovnice. Dalším krokem je nalezení partikulárního řešení. Partikulární řešení představuje stav soustavy, kdy se nachází v budoucím ustáleném stavu. Předpokládáme-li přechodný děj nabíjení kondenzátoru, lze pro partikulární řešení psát:

$$u_{partikulární} = u_{Rd}(\infty) = R_d \cdot I \quad (37)$$

Celkové řešení rovnice (31) lze interpretovat jako:

$$u_{Rd}(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + R_d \cdot I \quad (38)$$

Pro aplikaci v simulačním modelu a možnost algoritmizace je nutno vyjádřit konstantu K. Konstantu nejprve ze vzorce (38) osamostatníme zvolením konkrétních počátečních podmínek v čase  $t=0$ .

$$\begin{aligned} u_{Rd}(0) &= K \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} + R_d \cdot I = K + R_d \cdot I \\ K &= u_{Rd}(0) - R_d \cdot I \end{aligned} \quad (39)$$

Po dosazení do rovnice (38) vztah přechází do tvaru:

$$u_{Rd}(t) = (u_{Rd}(0) - R_d \cdot I) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + R_d \cdot I = u_{Rd}(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + R_d \cdot I (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (40)$$

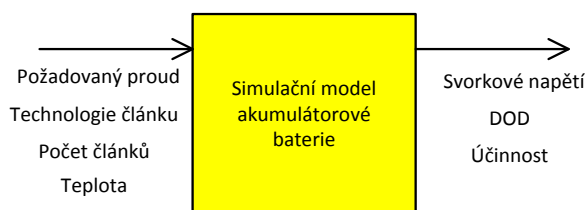
Zobecněním lze získat vztah, jenž lze následně aplikovat do simulačního modelu článku a vhodně naparametrovat.

$$u_{Rd}(t) = u_{Rd}(t_{předcházející}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + R_d \cdot I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (41)$$

### 3.4.1 Simulační model článku

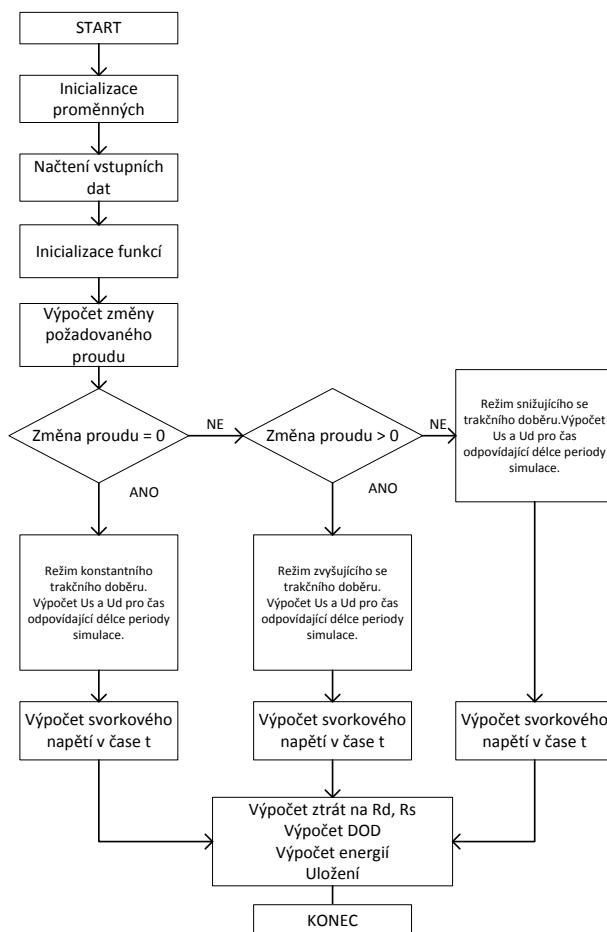
Simulační model článku představuje implementaci výše uvedených matematických vztahů do programového celku. Veličiny vstupující do modelu představují požadovaný proud, technologii článku, počet článků a teplotu. Výstupní veličiny pak charakterizují chování článku na základě vstupních dat. Typickou výstupní veličinou je svorkové napětí, hloubka vybití či ztráty na akumulátorové baterii během vybití či nabíjení.





Obrázek 66 - Blokové schéma simulačního modelu

Simulační model akumulátorové baterie je vytvořen v prostředí Matlab a jeho funkci lze vyjádřit následujícím vývojovým diagramem.



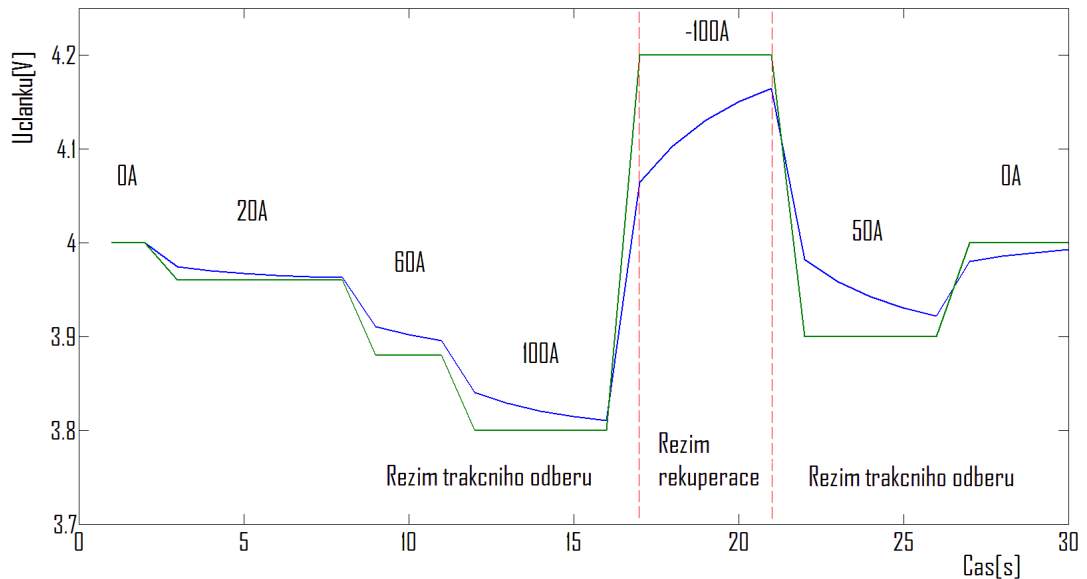
Obrázek 67 - Vývojový diagram simulačního modelu

Simulační model nejprve inicializuje použité proměnné, což pro první spuštění programu znamená vyčištění paměťového prostoru jednotlivých proměnných a alokace potřebného místa pro jejich plnění. V případě rozběhnutého programu znamená inicializace předání různorodých identifikátorů a pomocných proměnných z předchozího cyklu (informaci o předchozí velikosti požadovaného proudu, apod.). Dále model načte vstupní data jako velikost požadovaného proudu, technologii článku a popřípadě teplotu. Na základě načtených dat model aktivizuje příslušné funkce, jež obsahují matematické vyjádření příslušných závislostí (například závislost sériového vnitřního odporu na stupni vybití). V dalším kroku dojde k výpočtu rozdílu předchozího a současně požadovaného proudu, což vyjadřuje informaci, zda vozidlo snižuje či zvyšuje svoji tažnou sílu. Na základě režimu trakčního odběru pak dochází k výpočtu samotného svorkového napětí článku. Po příslušném výpočtu napětí následuje výpočet doplňkových veličin jako spotřebovaná energie za určitý čas či po dobu

jedné periody, výpočet ztrát na parazitních prvcích článku, DOD, apod. Výsledky jsou uloženy do příslušných vektorů či skalárů dle příslušné veličiny.

Pro případ validačních testů program pracuje v uzavřené smyčce typu for, kde je předem známa délka testovacího úseku. Pro případ implementace do celkového simulačního modelu vozidla dojde k nepatrným úpravám topologie tak, aby si veškerá vstupní a výstupní data korespondovala.

Funkčnost simulačního modelu dokládá následující testovací průběh.



Obrázek 68 - Testovací průběh funkčnosti simulačního modelu. Zelený průběh  $R_i$  model, modrý průběh Theveninův model

Graf na obrázku 68 znázorňuje napěťové odezvy  $R_i$  modelu a Theveninova modelu v závislosti na konkrétním proudovém odběru. Pro test simulace byly zvoleny následující výchozí proměnné:

- Jmenovité napětí článku: 4V
- Časová konstanta  $\tau$ : 3s
- $R_s$ : 1m $\Omega$
- $R_d$ : 1m $\Omega$
- $C_d$ : 3kF
- Testovací čas: 30s

Na počátku simulace není ze článku odebírán žádný proud, svorkové napětí článku odpovídá jmenovitému napětí bez zatížení, tedy 4V. V případě odběru 20A napětí dle  $R_i$  modelu klesne skokovitě o úbytek na sériově řazeném odporu  $R_s$  a  $R_d$ , kdežto svorkové napětí simulované dle Theveninova modelu skokovitě klesne pouze o velikost úbytku na  $R_s$  a dále klesá exponenciálně vlivem nabíjení kapacity  $C_d$ . Totožný případ lze sledovat pro případ trakčního odběru 60A a 100A. V případě rekuperace je energie dodávána do článku a vlivem opačného směru proudu se úbytek na parazitních prvcích článku k napětí článku přičítá, což je

patrné i na velikostech svorkového napětí. Jelikož v testovacím modelu není zohledněna závislost velikost svorkového napětí na stupni vybití, tudíž dosahuje velikost svorkového napětí článku na konci pracovního cyklu stejnou hodnotu jako na začátku.

### 3.5 Zhodnocení výsledků z vozidla a z laboratoře

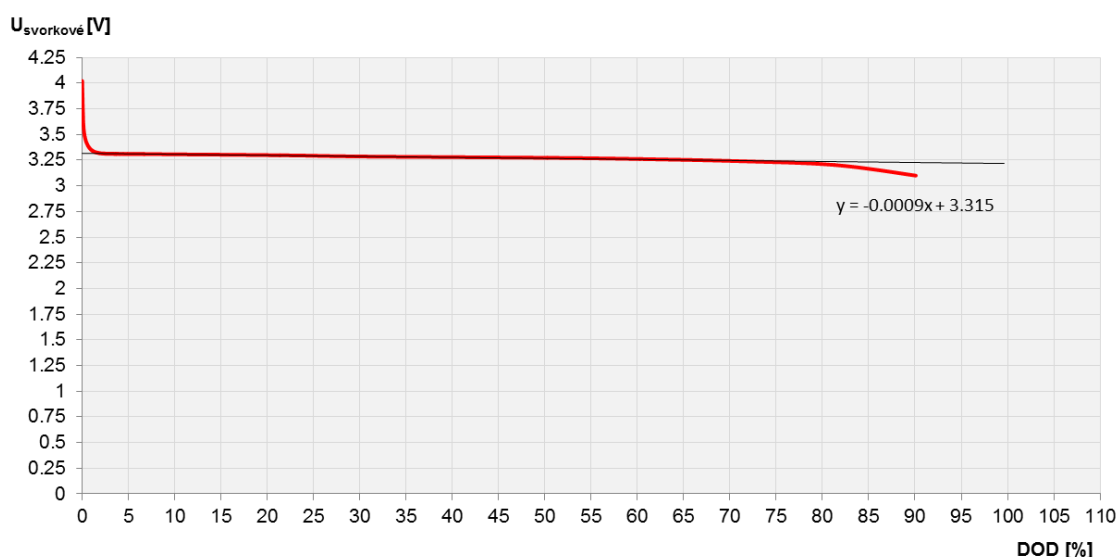
Významným indikátorem kvality simulačního modelu je validace. Výsledky simulace na základě separovaných parametrů z laboratorního měření lze předpokládat za věrohodné pouze tehdy, jsou-li doloženy porovnáním s průběhy z reálné aplikace. Jinak lze o přesnosti pouze spekulovat.

#### 3.5.1 Parametrizace simulačního modelu

Výchozím krokem validačních zkoušek je konkrétní parametrizace modelu. Na parametrizaci závisí přesnost dosažených výsledků a jejich věrohodnost. Parametrizace spočívá v nalezení matematického předpisu funkce, která hledanou proměnnou charakterizuje. Funkce je pak dána naměřeným průběhem z laboratorního měření.

Konkrétní charakter parametrizace simulačního modelu musí splňovat počáteční podmínky reálného měření. Pokud bylo reálné měření prováděno při teplotě prostředí 0°C, nelze využít pro parametrizaci data z článků měřených při 40°C. V ideální situaci by měly být parametrizační data adaptabilní i například na změny okolní teploty, avšak toto nebude pro případ dalších validací využito. Počáteční teplotní podmínky obou reálných měření, viz dále, byly takřka totožné, tedy 25°C. Pro parametrizaci se tedy využijí data laboratorního měření právě při 25°C.

Jednu z hledaných parametrizačních funkcí představuje závislost vnitřního napětí článku LFP 100Ah, tedy svorkové napětí bez zatížení. Extrakci funkce ilustruje následující obrázek.



Obrázek 69 - Proložení vybíjecí charakteristiky článku LFP 100Ah lineární charakteristikou

Základní průběh označený červenou barvou charakterizuje vybíjecí charakteristiku, přičemž tuto charakteristiku lze proložit lineární závislostí. Počáteční a koncovou nelinearitu lze zanedbat, neboť jejich vliv na celkový průběh představuje přijatelnou míru odchylky.

Vztah pro vybíjecí charakteristiku článku LFP 100Ah lze charakterizovat jako:

$$U_i = OCV = -0.0009 \cdot DOD + 3.315 \quad (42)$$

Výraz OCV je často užíván pro označení napětí článku bez zatížení (z anglického Open Circuit Voltage). Dalším postupem lze získat i další vztahy pro vnitřní sériový odpor  $R_s$ , dynamickou kapacitu  $C_d$  a dynamický odpor  $R_d$ .

Pro sériový odpor  $R_s$  článku LFP 100Ah platí:

$$R_s = 2 \cdot 10^{-9} \cdot DOD^3 - 10^{-7} \cdot DOD^2 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot DOD + 0.0006 \quad (43)$$

Pro dynamický odpor  $R_d$  článku LFP 100Ah platí:

$$R_d = 4 \cdot 10^{-6} \cdot DOD + 0.0004 \quad (44)$$

Pro dynamickou kapacitu  $C_d$  článku LFP 100Ah platí:

$$C_d = -700.8 \cdot DOD + 2 \cdot 10^5 \quad (45)$$

Vybíjecí charakteristiku článku Li-pol 25Ah potom definuje následující funkce:

$$U_i = OCV = 0.0068 \cdot DOD + 4.1 \quad (46)$$

Sériový odpor  $R_s$  článku Li-pol 25Ah potom:

$$R_s = 3 \cdot 10^{-7} \cdot DOD^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot DOD + 0.0018 \quad (47)$$

Dynamický odpor  $R_d$  článku Li-pol 25Ah:

$$R_d = 10^{-5} \cdot DOD - 10^{-5} \cdot I_{trakční} + 0.0021 \quad (48)$$

Dále pak dynamická kapacita  $C_d$  Li-pol 25Ah:

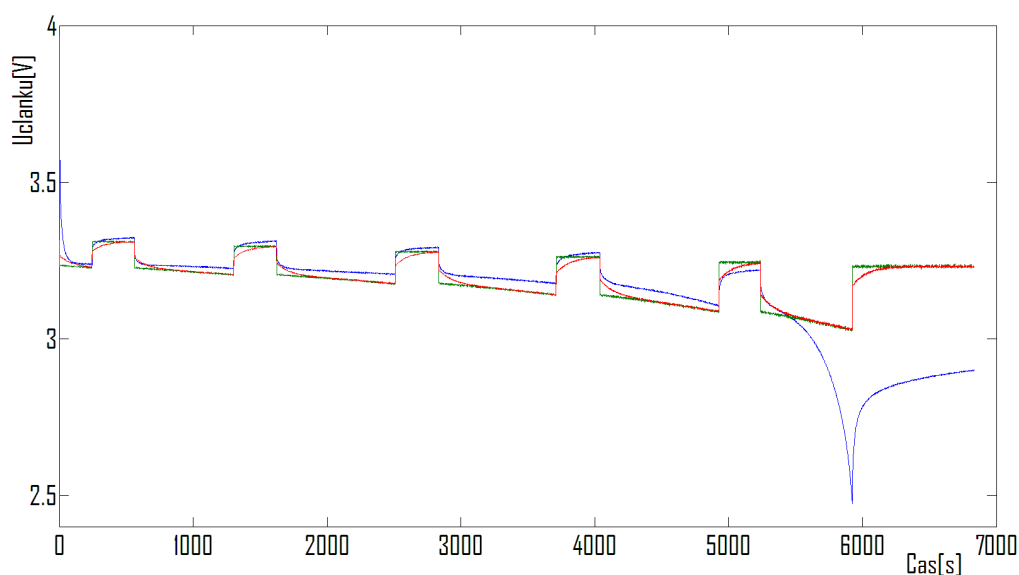
$$C_d = -81.844 \cdot DOD + 50000 \quad (49)$$

Výše uvedené vztahy tedy slouží pro konkrétní parametrizaci simulačního modelu, přičemž obsahují jednu (DOD) až dvě (DOD a odebíraný proud  $I_{trakční}$ ) vstupní proměnné.

### 3.5.2 Validace laboratorních výsledků

První fáze testování článků probíhala v laboratorních podmínkách. Primární fázi validačních zkoušek lze provést na základě naměřených laboratorních dat v případě testů, kdy jsou článku nuceny dynamické změny formou spínání a rozpínání externího vybíjecího obvodu.

Níže uvedené porovnávají tři charakteristiky, přičemž dvě představují výstup simulace a jedna reálně naměřená data.



Obrázek 70 - Validace laboratorních výsledků - celkový pohled

- Modrý průběh – reálné hodnoty

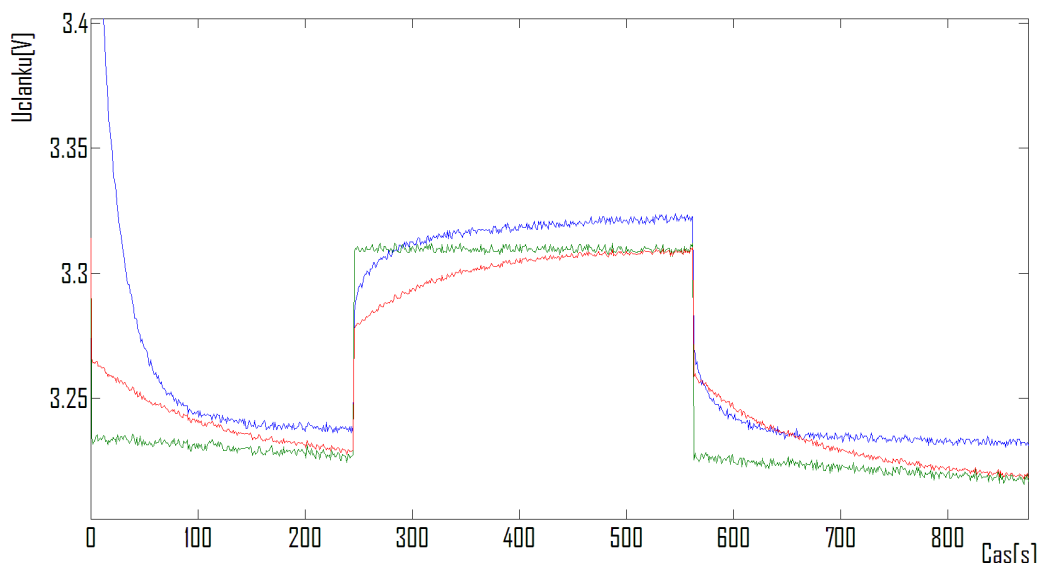
Průběh představuje reálně naměřená data u článku SP-LFP100AHA při odebíraném proudu 80A a teplotě 25°C. Na průběhu jsou patrné dynamické odezvy vlivem změn odebíraného proudu. Charakteristika vykazuje klesající charakter poplatný tvaru vybíjecí charakteristiky konkrétního článku.

- Zelený průběh –  $R_i$  model

Průběh představuje výstup simulačního modelu, kde byl uvažován  $R_i$  model článku. Změny odebíraného proudu se projeví na svorkovém napětí ve formě okamžitých změn na vnitřním odporu článku. Mezi reálnou modrou a zelenou charakteristikou je patrný konstantní rozdíl napětí o hodnotě maximálně 35mV. V procesu parametrizace se vychází z naměřených vybíjecích charakteristik, přičemž charakteristika znázorňující závislost vnitřního napětí  $U_i$  na DOD je počítána mimo jiné i s pomocí matematických vztahů definujících vnitřní odpor  $R_s$  a  $R_d$ . V procesu separace vztahů vlivem aproximací vznikají nepřesnosti, jejichž vliv je vidět právě zde.

- Červený průběh – Theveninův model

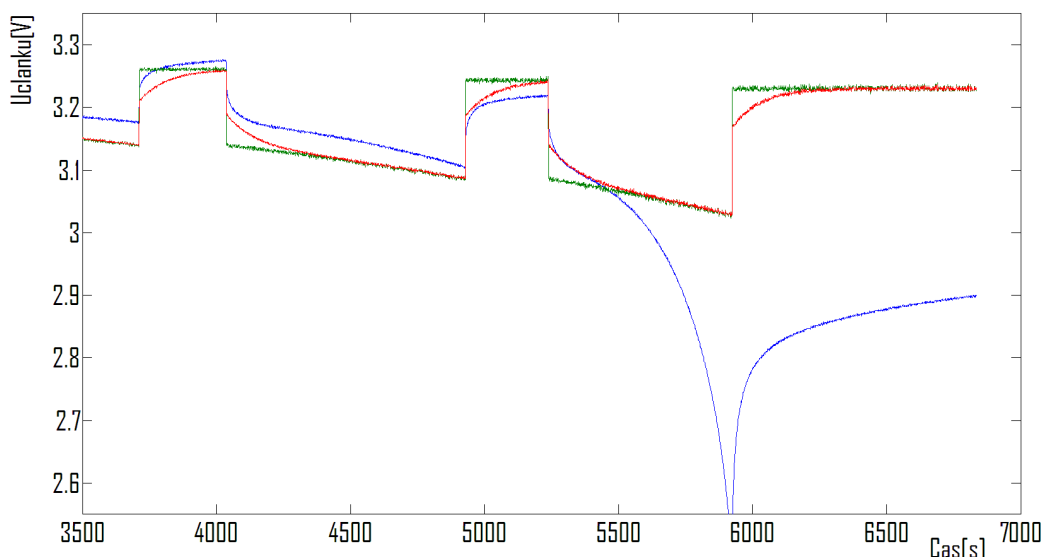
Průběh představuje stěžejní výstup simulačního modelu, kde byl uvažován Theveninův model článku. V závislosti na proudovém odběru se svorkové napětí nemění pouze skokovitě, ale i se zohledněním dynamické odezvy exponenciálního charakteru, což je pro zvolený model charakteristické.



Obrázek 71 - Validace laboratorních výsledků - detail dynamické odezvy napětí

Obrázek 71 znázorňuje detail odezvy svorkového napětí článku v závislosti na proudovém odběru. Na charakteru jednotlivých křivek lze sledovat detail rozdílného chování svorkového napětí. V případě zatížení článku reálné napětí (modrá) klesá z hodnoty svorkového napětí 4V po křivce exponenciálního charakteru. Po ustálení přechodného děje napětí klesá již takřka lineárně dle trendu vybíjecí charakteristiky. Odlehčením dojde ke vzrůstu napětí vlivem okamžité eliminace úbytku napětí na  $R_s$  včetně pozvolného poklesu napěťového úbytku na  $R_d$ , potažmo  $C_d$ . Dle detailního průběhu lze o přesnosti říci, že:

- Velikost svorkového napětí článku v ustáleném stavu závisí na přesnosti výpočtu trendu závislosti vnitřního napětí článku (OCV) na DOD. Z grafu vyplývá nepřesnost o velikosti přibližně  $\pm 30\text{mV}$  u jednoho měřeného článku LFP SP-LFP100AHA, což procentuálně představuje hodnotu přibližně  $\pm 0,9\%$
- Výstupní průběh simulace při uvažování  $R_i$  modelu vlivem nerespektování dynamických jevů dosahuje nejvyšších odchylek v případě rychlých změn odebíraného proudu. V případě ustáleného stavu se model  $R_i$  a model Theveninův napěťově shodují
- Výstupní průběh simulace se při uvažování Theveninova modelu svým tvarem nejvíce přibližuje realitě. V případě dynamických změn dochází k uplatnění dynamické odezvy, což má za následek věrnější a přesnější výsledky.



Obrázek 72 - Validace laboratorního měření - detail nepřesnosti v případě vysokého DOD

Obrázek 72 znázorňuje detail grafu 70 pro případ hloubky vybití nad 80% DOD. Simulační model využívá pro výpočet vnitřního napětí článku lineární závislost, ve které jsou eliminovány nelinearity převážně v případě plného nabití a vybití pod 80% DOD. Ve specifikaci technologie článků LFP je definováno, že by nemělo docházet k periodickému vybíjení článků právě pod 80% DOD z důvodů razantní snížení životnosti. Lineární aproximace vybíjecí charakteristiky technologie LFP tudíž není na závadu, neboť pracovní oblast by nad 80% vůbec neměla zasahovat.

Výše uvedené obrázky popisují chování simulovaných průběhů z hlediska napětíového. Během referenčního vybíjecího cyklu se zohledněním dynamických stavů článku docházelo z jeho svorek k odběru energie. Další validační zkouška se zabývá zhodnocením, jak velká energie byla ze svorek odebrána v případě reálného měření, simulačního modelu s uvažováním Ri topologie a simulačního modelu s uvažováním Theveninova modelu.

Pro odebranou energii platí:

$$W_{\text{odebraná}} = \int_0^t u_{\text{článek}} \cdot i_{\text{článek}} dt \quad (50)$$

Jelikož odebíraný proud je v případě obou simulačních modelů stejný, výsledná spočtená energie závisí pouze na velikosti svorkového napětí a jeho přesnosti.

Sumarizace výsledků pro případ měření článku LFP SP-LFP100AHA:

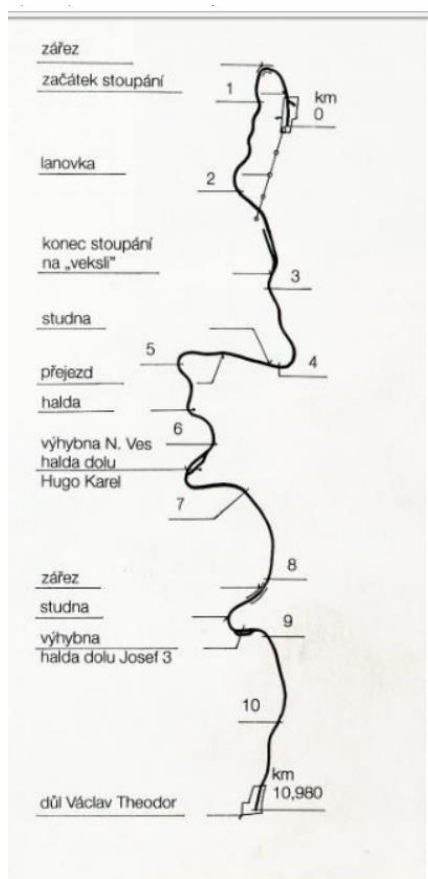
- Energetická náročnost reálného vybíjecího cyklu: 301,1Wh
- Energetická náročnost cyklu v případě využití Ri modelu: 300,1Wh
- Energetická náročnost cyklu v případě využití Theveninova modelu: 300,7Wh

Zde je patrné, že absolutní odchylka Theveninova modelu od reálné situace činí 0,4Wh (0,13%) a absolutní odchylka Ri modelu od reálné situace 1Wh (0,33%). **Z uvedených údajů vychází přesnější varianta pro případ Theveninova modelu.**

### 3.5.3 Validace výsledků z vozidla

K validaci přesnosti simulačního modelu neslouží pouze porovnání s dynamickými vybíjecími charakteristikami z laboratoře, ale i porovnání s reálně logovanými daty z experimentálního kolejového vozidla, jež bylo popsáno v předchozí stati práce. Kolejové vozidlo je sezónně provozováno na úzkorozchodné trati katastrálně spadající k obci Mladějov na Moravě a slouží převážně jako testovací vozidlo pro účely výzkumné či výukové. Trať v Mladějově na Moravě byla vybudována na konci První světové války a sloužila pro svoz lupku do přílehlého průmyslového podniku k dalšímu zpracování šamotu. Trať vykazuje úzkorozchodný charakter s rozchodem 600mm a celkovou délkou bezmála 11km.

Konkrétní situace trati je uvedena na následujícím obrázku:



Obrázek 73 – Délkové parametry Mladějovské průmyslové dráhy [35]

Výchozí bod tratě se nachází v nultém kilometru ve stanici Mladějov na Moravě. Trať nadále pokračuje stoupáním do stanice Veksl (ve vzdálenosti 2850m), dále do stanice Nová Ves (6300m) a dále směrem na konečnou Hřebeč. Maximální stoupání činí 26,2‰.

Energetická náročnost pojižděného úseku je pak dána součtem odporu ze sklonu tratě, odporem z oblouků a vozidlových odporů (aerodynamický odpor a odpor valivý).



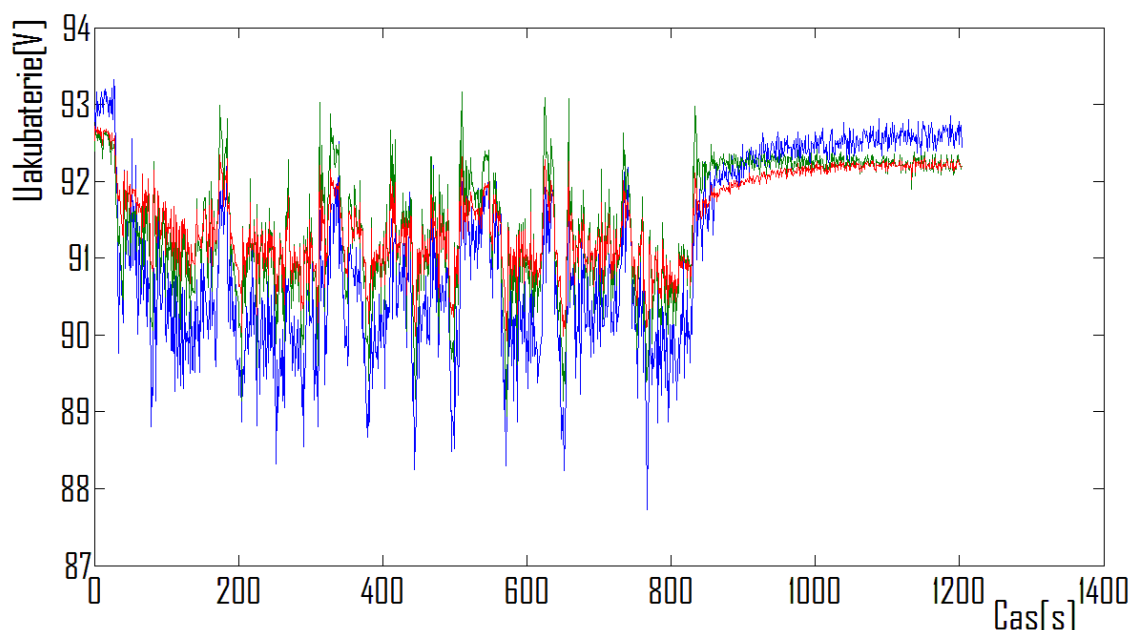
K validačním testům slouží převážně první úsek z pohledu nultého kilometru, tedy Mladějov na Moravě - Veksl, a druhý úsek Veksl - Nová Ves.

- **Úsek Mladějov na Moravě – Veksl, simulační model v režimu LFP 100Ah**

První validační zkouška představuje provoz vozidla na výchozím úseku Mladějov na Moravě – Veksl. Simulační model je naparametrován proměnnými separovanými z laboratorního měření na článku LFP SP-LFP100AHA.

Převýšení úseku: +61,3m

Délka úseku: 2850m



Obrázek 74 - Svorkové napětí akumulátorové baterie, LFP 100Ah Mladějov na Moravě - Veksl - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model

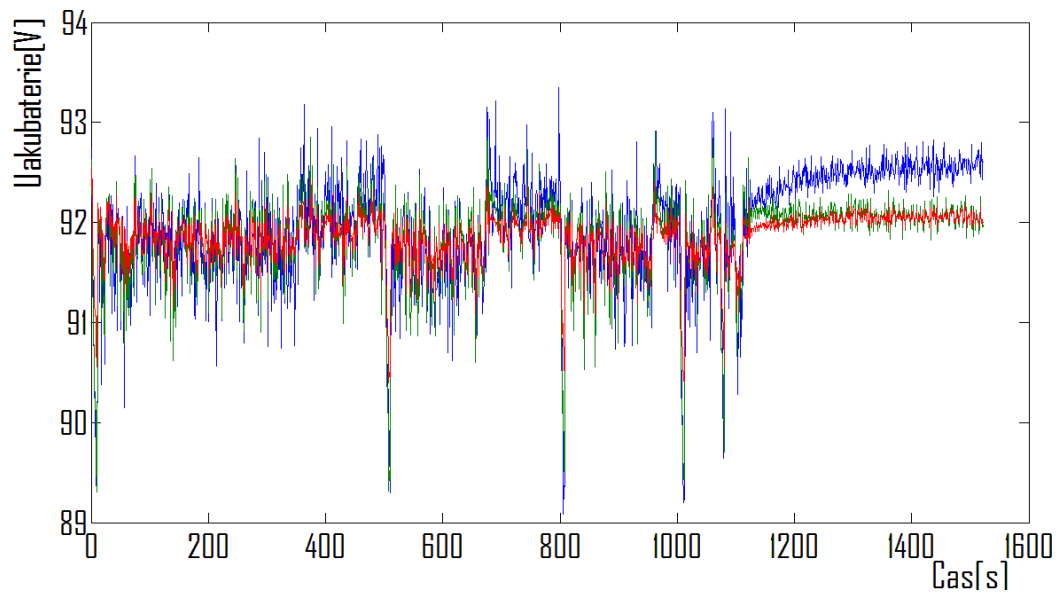
Výsledky měření:

- Reálně spotřebovaná energie: 1071Wh
- Spotřebovaná energie Ri model: 1079,1Wh
- Spotřebovaná energie Theveninův model: 1081,2Wh
- Ztráty na Rs: 11,8Wh
- Ztráty na Rd: 6,1Wh
- Ztráty na Rd v případě Ri modelu: 8,3Wh

- **Úsek Veksl – Nová Ves, simulační model v režimu LFP 100Ah**

Převýšení úseku: -0,17m

Délka úseku: 3450m



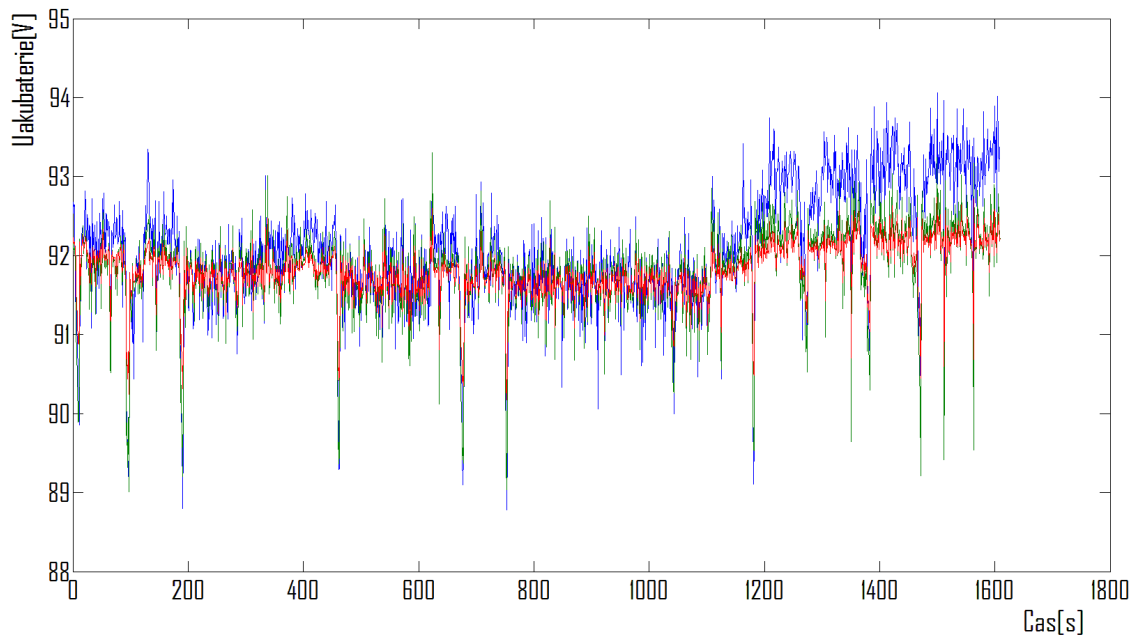
Obrázek 75 - Svorkové napětí akumulátorové baterie, LFP 100Ah, Veksl- Nová Ves - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model

Výsledky měření:

- Reálně spotřebovaná energie: 612,8Wh
  - Spotřebovaná energie Ri model: 612,1Wh
  - Spotřebovaná energie Theveninův model: 613,1Wh
  - Ztráty na Rs: 3,4Wh
  - Ztráty na Rd: 1,4Wh
  - Ztráty na Rd v případě Ri modelu: 2,5Wh
- 
- **Úsek Nová Ves - Veksl, simulační model v režimu LFP 100Ah**

Převýšení úseku: +0,17m

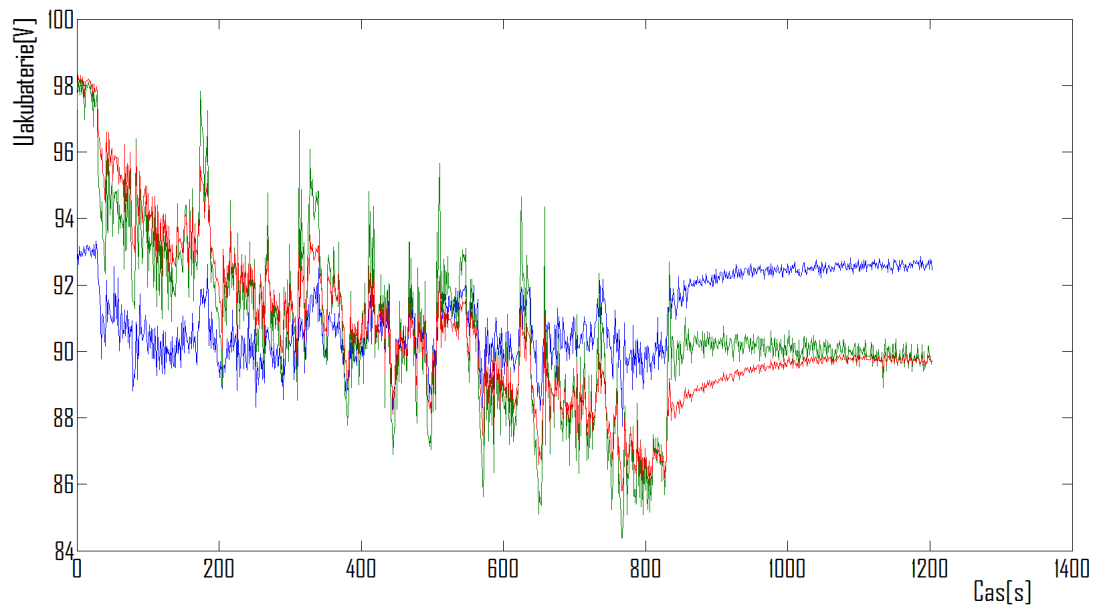
Délka úseku: 3450m



Obrázek 76 - Svorkové napětí akumulátorové baterie LFP 100Ah, Nová Ves - Veksl - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model

Výsledky měření:

- Reálně spotřebovaná energie: 476Wh
  - Spotřebovaná energie Ri model: 475,2Wh
  - Spotřebovaná energie Theveninův model: 476,8Wh
  - Ztráty na Rs: 3,5Wh
  - Ztráty na Rd: 1,1Wh
  - Ztráty na Rd v případě Ri modelu: 2,7Wh
- **Úsek Mladějov na Moravě - Veksl, simulační model v režimu Li-pol 25Ah**  
 Převýšení úseku: +61,3m  
 Délka úseku: 2850m



Obrázek 77 - Svorkové napětí akumulátorové baterie Li-pol 25Ah, Mladějov na Moravě - Veksl - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model

Výsledky měření:

- Reálně spotřebovaná energie: 1071Wh
- Spotřebovaná energie Ri model: 1068,3Wh
- Spotřebovaná energie Theveninův model: 1073,5Wh
- Ztráty na Rs: 25,2Wh
- Ztráty na Rd: 21,7Wh
- Ztráty na Rd v případě Ri modelu: 27,1Wh

### 3.5.4 Sumarizace výsledků z laboratoře a vozidla

Na základě měřených dat z vozidla a laboratoře lze sestavit soubor výstupů, jež charakterizují přesnost modelu v závislosti na okolních podmínkách.

Zhodnocení účinnosti provozu akumulátorového systému lze vyhodnotit ze simulovaných ztrát na prvcích Rs a Rd.

Pro celkovou účinnost provozu akumulátorové baterie v režimu nabíjení/vybíjení platí vztah:

$$\eta_{akubaterie} = \frac{\sum U_{cell} \cdot I_{cell} \cdot \Delta t - \Delta W_{Rs} - \Delta W_{Rd}}{\sum U_{cell} \cdot I_{cell} \cdot \Delta t} \cdot 100 \quad (51)$$

Měřený úsek	Mladějov na Moravě - Veksl	Veksl – Nová Ves	Nová Ves - Veksl	Mladějov na Moravě - Veksl
Režim simulačního modelu	LFP SP-LFP100AHA	LFP SP-LFP100AHA	LFP SP-LFP100AHA	Li-pol SLPB 25Ah
Reálně spotřebovaná energie [Wh]	1071	612,8	476	1071
Spotřebovaná energie Ri model [Wh]	1079,1	612,1	475,2	1068,3
Spotřebovaná energie Theveninův model [Wh]	1081,2	613,1	476,8	1073,5
Odchylka Ri modelu [%]	+0,76	-0,11	-0,17	-0,25
Odchylka Theveninova modelu [%]	+0,95%	+0,05	+0,17	+0,23
Ztrátová energie na Rs [Wh]	11,8	3,4	3,5	25,2
Ztrátová energie na Rd (Theveninův model) [Wh]	6,1	1,4	1,1	21,7
Ztrátová energie na Rd (Ri model) [Wh]	8,3	2,5	2,7	27,1
Účinnost provozu Ri model [%]	98,13	99,04	98,7	95,1
Účinnost provozu Theveninův model [%]	98,34	99,21	99,04	95,63

Tabulka 4 – Souhrnné výsledky validace simulačního modelu

Tabulka 4 sumarizuje souhrnné výsledky validace simulačního modelu s výsledky naměřenými na reálném vozidle.

První měření bylo prováděno pro výchozí úsek Mladějov na Moravě – Veksl. Jedná se o úsek, v němž se nachází nejvyšší stoupání a z měřených úseků je nejvíce energeticky náročný. Reálně spotřebovaná energie činí 1071Wh, v případě simulace úseku pomocí Ri modelu vychází energie 1079Wh a v případě simulace úseku pomocí Theveninova modelu 1081,2Wh. Z výsledků první simulace vychází, že si energeticky nejbližší stojí model Ri, přičemž procentuální odchylka obou modelů se vejde do +/-1% ve vztahu k reálně spotřebované energii.

Druhé měření probíhalo na dalším přilehlém traťovém úseku Veksl – Nová Ves, jehož energetická náročnost není tak značná jako předchozí úsek. Reálně naměřená spotřebovaná

energie činí 612,8Wh, v případě simulace úseku pomocí Ri modelu energie činí 612,1Wh a v případě simulace úseku pomocí Theveninova modelu 613,1Wh. Procentuální odchylky na rozdíl od prvního traťového úseku naznačují větší přesnost Theveninova modelu, přičemž Theveninův model vykazuje kladnou toleranci, Ri model zápornou.

Třetí měřený úsek představuje totožný předchozí, pouze s rozdílem opačného směru, tedy Nová Ves - Veksl. Reálně naměřená energie činí 476Wh, v případě simulace pomocí Ri modelu 475,2Wh, pro případ simulace pomocí Theveninova modelu 476,8Wh. Procentuální odchylka je u obou modelů totožná, přičemž odchylka Theveninova modelu vykazuje kladnou hodnotu a odchylka Ri modelu odchylku zápornou.

Poslední sloupec v sumarizační tabulce představuje případ, kdy je pro úsek Mladějov na Moravě – Veksl využita akumulátorové baterie technologie Li-pol Kokam SLPB 25Ah. Vstup simulačního modelu tvoří reálný odebíraný proud, přičemž DOD je počítáno interně v modelu. Reálně naměřená energie akumulátorové baterie LFP 100Ah činí 1071Wh, odebraná energie v případě Li-pol 25Ah pomocí Ri modelu představuje 1068,3Wh a odebraná energie v případě Li-pol 25Ah pomocí Theveninova modelu vychází 1073,5Wh. Ze simulovaných údajů lze usoudit, že Theveninův model opět vykazuje kladnou odchylku a Ri model odchylku zápornou.

Ve všech případech měření lze shledat, že energetické úbytky na parazitních vnitřních odporech  $R_s$  a  $R_d$  představují nezanedbatelnou část spotřebované energie. Rozdíl mezi Ri modelem a Theveninovým modelem lze najít mimo jiné i zde. Z důvodu okamžitých změn úbytku napětí na  $R_d$  v případě Ri modelu vycházejí energetické úbytky větší než u modelu Theveninova. Úbytky napětí na  $R_d$  v případě Theveninova modelu jsou tlumeny dynamickou kapacitou  $C_d$ , což se projevuje ve snížených ztrátách.

Účinnost provozu Li-pol akumulátorové baterie vykazuje účinnost o řády jednotek nižší, což je způsobeno velikostí vnitřního odporu  $R_s$  a  $R_d$ . Na poměry článků v hladině 25Ah má simulovaný článek Kokam SLPB 25Ah oproti konkurenčním výrobkům parametry skvělé. Bohužel v porovnání s akumulátorovou baterií LFP 100Ah, jež je na vozidle instalována, vykazuje absolutní hodnoty vnitřních odporů vyšší.

**Ze sumarizační tabulky a z laboratorního měření lze jednoznačně definovat závěry:**

- **Simulační model založený na Theveninově obvodovém modelu článku dosahuje oproti Ri obvodovému modelu článku výrazně vyšší napěťovou přesnost. Průběh svorkového napětí článku simulovaného pomocí Theveninova modelu věrněji vystihuje dynamické děje, které lze u reálného článku shledat.**
- **Napěťová odchylka obou modelů v ustáleném stavu je od reálných průběhů menší než 1%.**
- **Simulační model založený na Theveninově obvodovém modelu vykazuje pro všechny měřené případy (jak v laboratoři, tak na vozidle) větší energetickou náročnost než simulační model založený na Ri obvodovém modelu. Tento fakt přispívá ke zvýšení energetické rezervy simulovaného akumulátorového systému v porovnání se simulačním modelem typu Ri.**
- **V každém ze simulovaných případů vykázal Theveninův model kladnou odchylku od reality. Tento fakt opět přispívá ke zvýšení energetické rezervy simulovaného akumulátorového systému.**

- Ve všech, měřených úsecích, kromě jednoho, vykazoval Theveninův model vyšší či stejnou přesnost v porovnání s  $R_i$  modelem.
- Účinnost provozu akumulátorového systému závisí na technologii použitých článků akumulátorové baterie, jejich dimenzování a velikosti trakčního proudu. Každá technologie Li článků vykazuje jiné hodnoty dlouhodobých vybíjecích proudů (což souvisí s velikostí vnitřního odporu), přičemž ztráty na akumulátorové baterii rostou kvadraticky s pracovním proudem.
- Každý měřený článek je originál což platí i pro naměřená data. Z toho důvodu může být do simulace zavedena systematická chyba, která uchýlí výsledky směrem k charakteru zdrojových dat. Nepřesnosti lze shledat u neshody svorkového napětí akumulátorové baterie experimentálního vozidla v porovnání se simulací.

### 3.6 Zobecnění výsledků pro aplikaci v simulačním modelu vozidla

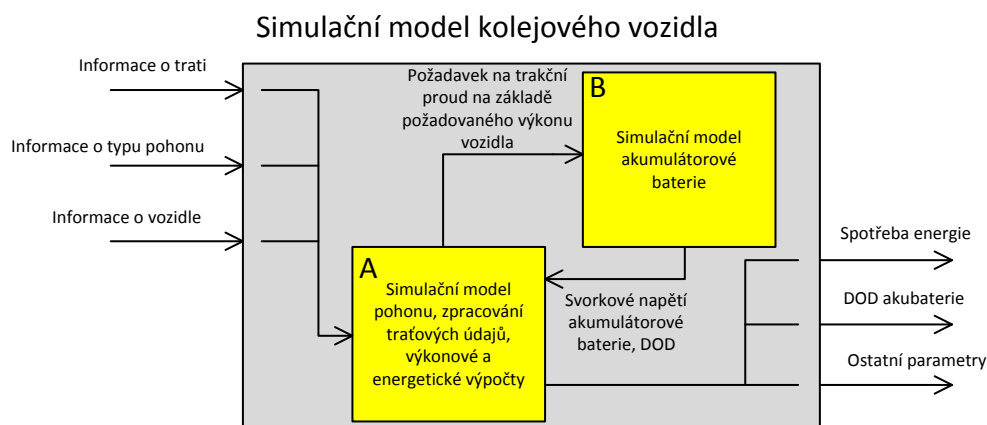
Návrh akumulátorového systému jako celku představuje celkem tři funkční fáze – zjištění parametrů trati z energetického a výkonového hlediska na základě simulací, optimalizace akumulátorového systému a ověření vhodnosti daného akumulátorového systému opět na základě simulací. V případě validačních simulací s nevyhovujícím výsledkem je nutno fázi optimalizace opakovat.

První fázi návrhu akumulátorového systému je zjištění těchto veličin:

- Zjištění maximální energetické náročnosti neelektrifikovaného úseku
- Zjištění maximálního výkonu odebíraného z akumulátoru – režim jízdy
- Zjištění maximálního výkonu dodávaného do akumulátoru – režim nabíjení

Uvedené veličiny tvoří jednu z množin výsledků existujícího komplexního simulačního modelu kolejového vozidla, jehož autor patří do skupiny řešitelů vozidel s akumulátorovým napájením. Simulační model vozidla lze aplikovat na jakýkoli známý traťový úsek, k němuž lze získat rychlostní, délkové a výškové podklady. Energie potřebná pro překonání daného úseku činí součet energií pro pokrytí vozidlových odporů (aerodynamický, apod.) a traťových odporů (odpor ze stoupání, z tunelu, z oblouku). Odebíraný výkon ze svorek akumulátoru je dán místem s největšími výkonovými nároky, což obvykle znamená jízdu do stoupání.

Simulační model článku, potažmo akumulátorové baterie, představuje funkční prvek celkového simulačního modelu kolejového vozidla. Na jeho přesnosti zásadním způsobem závisí přesnost chování simulovaného vozidla z pohledu energetického a výkonového.



Obrázek 78 - Simulační model kolejového vozidla

Simulační model kolejového vozidla na svém vstupu načítá data o trati (informace o stoupání, klesání, velikostech oblouků, poloze stanic, traťových rychlostech, apod.), dále data o typu pohonu (informace o typu trakčních motorů a jejich počtu) a informace o vozidle (hmotnost, aerodynamické koeficienty a další informace pro výpočet vozidlových odporů). Data jsou načtena do bloku A, kde probíhají energetické a trakční výpočty, přičemž aktuální svorkové napětí článku dodává blok B na základě požadovaného trakčního proudu. Výstupem modelu kolejového vozidla je celková spotřeba energie, hloubka vybití akumulátorové baterie a ostatní aktuálně potřebné parametry.

## 4 VÝZNAM VÝSLEDKŮ PRO VĚDU A PRAXI

Dimenzování akumulátorového systému tvoří zdoluhavý proces, kdy se nejprve zkoumají limitní stavy vozidla – napěťové rozsahy, proudové rozsahy, pracovní teploty, apod., přičemž snahou je prognostikovat chování reálné akumulátorové baterie na základě definovaného modelu a vlivů. Disertační práce popisuje ve své stati mimo jiné rešerši nejpoužívanějších obvodových modelů článků, přičemž každý z nich představuje bližší či vzdálenější přiblížení se realitě. Problém složitých a přesných simulačních modelů je v jejich obtížné parametrizaci, naproti tomu problém jednoduchých modelů tkví v nepřesnosti. Vhodnou volbou kompromisu lze získat věrohodná data při současně schůdném procesu parametrizace.

Cílem disertační práce bylo nalézt optimální koncepci modelu v souvislosti s dostatečnou přesností a schůdnou parametrizací. Na základě modelu, co nejblíže se blížího realitě, pak provést patřičnou parametrizaci pomocí experimentálně zjištěných dat a optimální metodiky, dále vytvořit simulační model a výsledky validovat porovnáním s daty reálně naměřenými.

Majoritní přínosy pro vědní disciplínu lze sumarizovat v těchto bodech:

- Uplatnění simulačního modelu článku, respektive akumulátorové baterie, je cílené na zpřesnění celkového simulačního modelu kolejového vozidla. Zpřesněná data budou poskytovat věrohodnější představu o reálném chování simulovaného vozidla.
- Vzniklý simulační model představuje univerzální nástroj, jenž lze naparametrovat jakýmkoli typem technologie článku.
- Sestavený měřicí plán sestává z širokého množství kombinací vlivů na měřený článek. Výsledné charakteristiky tak dávají uživateli nedocenitelnou představu o



reálných parametrech článku, které není možno ve většině katalogových listů zjistit.

- Použité metodiky vyhodnocování parametrů lze v budoucnu aplikovat i na další typy článků, přičemž lze využít i sestaveného hardwarového zařízení.

Přínosy pro praxi představují následující body:

- Praktický význam výsledků disertační práce spočívá v uplatnitelnosti simulačního modelu při návrhu dvouzdrojových jednotek pro provoz na tratích Jihomoravského kraje a v uplatnitelnosti simulačního modelu při návrhu akumulátorové posunovací lokomotivy v rámci projektu TRIO ve spolupráci s firmou CZ-LOKO.

## 5 ZÁVĚR

Současná situace na poli dopravní techniky zažívá značný boom v souvislosti se stále frekventovaněji užívaným slovem elektromobilita. Ve správném slova smyslu se jedná o disciplínu, jež snoubí dopravní prostředky a elektrickou energii do jednoho celku. Z historického hlediska není elektromobilita ničím novým, neboť elektrická vozidla lze na dráze či pozemních komunikacích v hojném počtu potkávat více než padesát let. Dnešní elektromobilita dostala moderní kabát v podobě uplatnění elektrochemických akumulátorů energie, čili představuje disciplínu snoubící dopravní prostředky a nezávislou trakci.

Elektrochemické lithiové akumulátory energie představují moderní zdroj energie, jež mají uplatnění v širokém spektru aplikací. Omezujícím prvkem každého akumulátorově poháněného vozidla je kapacita akumulátorové baterie, která majoritním dílem vymezuje akční rádius vozidla. Uváží-li se velikost poměrných ztrát vlivem valivého odporu v případě silničního vozidla a vozidla kolejového, lze jednoznačně říci, že výrazně nižší ztráty představuje vozidlo kolejové. Aplikace elektrochemických akumulátorů by se nejen z uvedeného důvodu neměla omezit pouze na dopravu silniční, ale zohlednit i velice výhodné podmínky nástupu elektromobility v kolejové dopravě.

Jelikož akumulátorově poháněné vozidlo vykazuje vysokou míru závislosti na dobíjecím systému, dimenzování a návrh akumulátorového systému představuje jednu z nejdůležitějších partií návrhu samotného vozidla a určuje jeho celkovou využitelnost.

Cíle disertační práce jsou zaměřeny v úvodní popisné části na rešerši vlastností Li trakčních akumulátorů. Uvedená partie shrnuje současně nejpoužívanější technologie Li článků jak pro trakční aplikace, tak pro náročné aplikace například v oblasti ručního nářadí. Jedním z dalších cílů je definování vhodné struktury a parametrů simulačního modelu akumulátoru, který lze začlenit do simulačního modelu celkového kolejového vozidla. Uvedená část popisuje rešerši nejpoužívanějších obvodových modelů článků včetně používaných parametrů. Na základě optimálního poměru mezi přesností a složitostí modelu byl vybrán model Theveninův, jenž zohledňuje dynamické chování článku. Parametrizace pak spočívá v nalezení závislostí popisující vybíjecí charakteristiky, sériový vnitřní odpor, dynamický vnitřní odpor a dynamickou kapacitu. Tyto parametry byly zjištěny na základě experimentálního laboratorního měření vybraných Li článků za různých teplot okolí. Na základě zjištěných parametrů Theveninova obvodového modelu byl vytvořen simulační model článku v prostředí Matlab. Proces validace přesnosti modelu představovalo porovnání simulovaných průběhů  $R_i$  a Theveninova modelu s daty z reálného měření v laboratoři a na reálném vozidle, přičemž finální validační výsledky lze charakterizovat takto:

- Simulační model založený na Theveninově obvodovém modelu článku dosahuje oproti  $R_i$  obvodovému modelu článku výrazně vyšší napěťovou přesnost. Průběh svorkového napětí článku simulovaného pomocí Theveninova modelu věrněji vystihuje dynamické děje, které lze u reálného článku sledovat.
- Napěťová odchylka obou modelů v ustáleném stavu je od reálných průběhů menší než 1%.
- Simulační model založený na Theveninově obvodovém modelu vykazuje pro všechny měřené případy (jak v laboratoři, tak na vozidle) větší energetickou náročnost než simulační

model založený na  $R_i$  obvodovém modelu. Tento fakt přispívá ke zvýšení energetické rezervy simulovaného akumulátorového systému v porovnání se simulačním modelem typu  $R_i$ .

- V každém ze simulovaných případů vykazoval Theveninův model kladnou odchylku od reality. Tento fakt opět přispívá ke zvýšení energetické rezervy simulovaného akumulátorového systému.

- Ve všech, měřených úsecích, kromě jednoho, vykazoval Theveninův model vyšší či stejnou přesnost v porovnání s  $R_i$  modelem.

- Účinnost provozu akumulátorového systému závisí na technologii použitých článků akumulátorové baterie, jejich dimenzování a velikosti trakčního proudu. Každá technologie Li článků vykazuje jiné hodnoty dlouhodobých vybíjecích proudů (což souvisí s velikostí vnitřního odporu), přičemž ztráty na akumulátorové baterii rostou kvadraticky s pracovním proudem.

- Každý měřený článek je originál což platí i pro naměřená data. Z toho důvodu může být do simulace zavedena systematická chyba, která uchýlí výsledky směrem k charakteru zdrojových dat. Nepřesnosti lze shledat u neshody svorkového napětí akumulátorové baterie experimentálního vozidla v porovnání se simulací.

Výše uvedená sumarizace výsledků uvádí celkový přehled zjištěných trendů chování akumulátorové baterie v souvislosti s akumulátorovým napájením kolejového vozidla. Všechny cíle uvedené v kapitole 2 byly zpracovány následovně:

- Rešerše vlastností Li trakčních akumulátorů

Rešerše vystihuje historický vývoj akumulátorově napájených drážních vozidel, dále pak přehled nejpoužívanějších Li trakčních akumulátorů a přehled obvodových modelů. Uvedenou partii popisují kapitoly 1.1 – 1.7.

- Definování vhodné struktury a parametrů simulačního modelu akumulátoru, který lze začlenit do simulačního modelu pohonného řetězce kolejového vozidla

Uvedený cíl je řešen v kapitole 3.1. Kapitola popisuje výběr vhodného modelu článku a vhodného simulačního prostředí.

- Realizace akumulátorového systému a BMS na experimentálním kolejovém vozidle

Pro možnost testování Li článků přímo v reálném provozu byla v rámci disertační práce provedena úprava zdrojové části experimentálního kolejového vozidla z technologie Pb na Li. Podrobné pojednání o konstrukci a funkcionalitě podává kapitola 3.3.

- Měření vlivu charakteru jízdy vozidla na účinnost vybíjení u různých akumulátorových systémů

Měření vlivu charakteru jízdy na účinnost vybíjení bylo provedeno formou reálného měření na různých úsecích testovací tratě s různým stoupáním a různými parametry simulačního modelu. Výsledky uvádí kapitola 3.5

- Parametrizace simulačního modelu na základě testování různých typů Li akumulátorů v laboratoři a na experimentálním kolejovém vozidle s ohledem na využití v celkovém modelu dvouzdrojového vozidla

Proces parametrizace popisuje kapitola 3.2, 3.3 a 3.4. Na základě laboratorních testů jednotlivých článků byly separovány potřebné závislosti neznámých parametrů modelu článku, které slouží k parametrizaci vzniklého simulačního modelu. Simulační model je navržen tak, aby zapadal do koncepce struktury celkového simulačního modelu pohonu kolejového vozidla.

- Návrh metodiky pro optimalizaci akumulátorového systému kolejového vozidla

Návrh metodiky popisuje kapitola 1.8 a 1.9. Kapitoly shrnují základní požadavky na akumulátorový systém včetně postupu jeho optimalizace.

## Použitá literatura

- [1] Einhorn, M, Conte, F. V., Kral, Ch., Fleig, J.: Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, sv. 28, č. 3, IEEE Power Electronics Society 2013, ISSN 0885-8993
- [2] Hongwen He, Rui Xiong, Jinxin Fan: Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, Energies roč. 2011, č. 4, www.mdpi.com, ISSN 1996-1073
- [3] Mousavi, S. M., Nikdel, M.: Various battery models for various simulation studies and applications, Renewable & Sustainable Energy Reviews, roč. 2014, sv.32, www.elsevier.com/locate/rser, ISSN 1364-0321
- [4] Sadílek, O.: Metodika výpočtu akumulátorů pro dvouzdrojové kolejové vozidlo, Sborník z konference Elektrotechnická zařízení v dopravě 2014. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-749-0
- [5] Novák, J., Mlynařík, L., Lelek, T.: Možnosti využití kolejových vozidel s kombinovaným napájením v regionální osobní dopravě, časopis ELEKTRO, č. 6/2015, roč. 25, vydavatelství FCC Public, ISSN 1210-0889
- [6] Firemní materiály Winston Battery
- [7] Firemní materiály Saft
- [8] Firemní materiály Kokam
- [9] Firemní materiály Toshiba
- [10] [RAHNOUN, Ahmad a Helmuth BEICHL. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. 2012, 5. ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b/2012
- [11] JOHNSON, Valerie, Ahmad PESARAN a Thomas SACK. Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries. 17th Annual Electric Vehicle Symposium. Montreal, Canada, 2001, 2001, 17. ISSN NREL/CP-540-28716.
- [12] CHEN, Min a Gabriel RINCON-MORA. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. June 2006(Vol. 21, No. 2), 8.
- [13] HENTUNEN, Ari a Teemu LEHMUSPELTO. Time-Domain Parameter Extraction Method for Thévenin-Equivalent Circuit Battery Models. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. September 2014(Vol.29, No.3), 9.
- [14] LINDEN, David a Thomas B. REDDY. Handbook of Batteries: Third edition. McGraw-Hill, 2002, , 1454. ISBN 0-07-135978-8

- [15] KROEZE, Ryan a Philip KREIN. Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations. 2008, , 7. ISSN 978-1-4244-1668-4.
- [16] MLYNAŘÍK, Ladislav, Jaroslav NOVÁK, Tomáš LELEK, Ondřej SADÍLEK, Radovan DOLEČEK a Zdeněk MAŠEK. Studie možnosti provozu dvouzdrojových vozidel v Jihomoravském kraji. Pardubice, 2014. Studie. Univerzita Pardubice, DFJP
- [17] DVORSKÝ, G. Balancující BMS typu 2, verze 5.x: Dokumentační materiály výrobku firmy MGM Compro. Zlín
- [18] ALBRIGHT, EDIE a Said AL-HALLAJ. A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications. 2012, s. 14
- [19] HOFFART, Fran. Proper Care Extends Li-ion Battery Life. 2008, s. 5. Dostupné z: [www.powerelectronics.com](http://www.powerelectronics.com)
- [20] KISLITSYN, Ph.D.Mikhail. Li-ion Batteries Basics. s. 40
- [21] ERDINC, VURAL a UZUNOGLU. A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading. 2009, s. 4
- [22] Types of Lithium-ion. Battery university. 2014. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [23] Idnes.cz: Vizionář, který rozsvítil české ulice [online]. [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: [http://zpravy.idnes.cz/vizionar-ktery-rozsvitil-ceske-ulice-d86-/zpr\\_archiv.aspx?c=A111112\\_1683859\\_kavarna\\_bar](http://zpravy.idnes.cz/vizionar-ktery-rozsvitil-ceske-ulice-d86-/zpr_archiv.aspx?c=A111112_1683859_kavarna_bar)
- [24] Wikipedia: EV-E301 [online]. [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/EV-E301\\_series](https://en.wikipedia.org/wiki/EV-E301_series)
- [25] Vossloh Kiepe: Batterie-Lokomotive Wien, Österreich [online]. [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: <http://www.vossloh-kiepe.com/vkproduktordner.2008-05-14.1154367607/vkproduktordner.2008-06-04.7524991552/vkproduktordner.2008-06-26.6347466646/vkprodukt.2008-06-09.0778399818>
- [26] Wikipedia: British Rail Class 379 [online]. [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/British\\_Rail\\_Class\\_379](https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_379)
- [27] Designmag: Škoda vyrobila Turecku tramvaje v islámském stylu [online]. [cit. 2015-09-06]. Dostupné z: <http://www.designmagazin.cz/technika/44879-skoda-vyrobila-turecku-tramvaje-v-islamskem-stylu.html>
- [28] Byznys Lidovky: Tramvaje pro šejky trápí písek i vedra. Výzva, říká manažer Siemensu Zdroj: [http://byznys.lidovky.cz/tramvaje-pro-sejky-trapi-pisek-i-vedra-vyzva-rika-manazer-siemensu-1ds-/doprava.aspx?c=A150424\\_164243\\_In-doprava\\_pave](http://byznys.lidovky.cz/tramvaje-pro-sejky-trapi-pisek-i-vedra-vyzva-rika-manazer-siemensu-1ds-/doprava.aspx?c=A150424_164243_In-doprava_pave) [online]. [cit. 2015-09-06]. Dostupné z:

[http://byznys.lidovky.cz/tramvaje-pro-sejky-trapi-pisek-i-vedra-vyzva-rika-manazer-siemensu-1ds-/doprava.aspx?c=A150424\\_164243\\_ln-doprava\\_pave](http://byznys.lidovky.cz/tramvaje-pro-sejky-trapi-pisek-i-vedra-vyzva-rika-manazer-siemensu-1ds-/doprava.aspx?c=A150424_164243_ln-doprava_pave)

- [29] Produkty firmy Siemens: Soupravy M1 pro metro Praha [online]. : 20 [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/ET/Dr.-07-Prorail.pdf>
- [30] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. Matlab pro začátečníky: 2. vydání. Praha: BEN Technická literatura, 2005, 151 s.
- [31] VYROUBAL, P., J. MAXA a T. KAZDA. Simulation of the Behaviour of the Lithium Ion Battery. Advances in Military Technology. Brno, 2014(9), 9s.
- [32] SADÍLEK, O. Návrh a optimalizace bateriového systému pro kolejové vozidlo: Odborná práce ke státní doktorské zkoušce. Pardubice, 2015, 49 s. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [33] NOVÁK, Jaroslav, Ondřej SADÍLEK a Petr SÝKORA. Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu. Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku. FCC Public, 2016, 26(1. část 11, 2. část 12). ISSN 1210-0889.
- [34] Mathworks: Implement generic battery model. Www.mathworks.com [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>
- [35] Firemní materiály Mladějovské průmyslové dráhy

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Křižíkova akumulátorová tramvaj[23].....	10
Obrázek 2 - Vozidlo EV-E301 [24].....	11
Obrázek 3 - Posunovací lokomotiva vídeňského metra[25].....	11
Obrázek 4 - Jednotka Class 379 013 [26].....	11
Obrázek 5 - Tramvaj Škoda 28T2[27].....	12
Obrázek 6 - Tramvaj Siemens[29].....	12
Obrázek 7 - Ri model článku.....	25
Obrázek 8 - Napěťová odezva napětí Ri modelu článku.....	26
Obrázek 9 - Theveninův model článku.....	27
Obrázek 10 - Napěťová odezva Theveninova modelu článku.....	27
Obrázek 11 - Modifikovaný Theveninův model.....	28
Obrázek 12 - RC model článku.....	28
Obrázek 13 - Theveninův DP model.....	29
Obrázek 14 - Theveninův model zohledňující samovybíjení.....	29
Obrázek 15 - Návrh simulačního modelu v prostředí Matlab.....	31
Obrázek 16 - Vnitřní struktura bloku Battery [34].....	32

Obrázek 17 - Akumulátorový systém vozidla v součinnosti se spotřebičem .....	35
Obrázek 18 - Měřicí pracoviště pro měření článků při zvýšené teplotě .....	42
Obrázek 19 - Schéma nabíjecího stanoviště .....	43
Obrázek 20 - Reálná fotografie měřicího pracoviště .....	44
Obrázek 21 - Elektronická regulace ztrátového výkonu - principiální schéma .....	45
Obrázek 22 - Měřicí pracoviště pro komplexní laboratorní zkoušky .....	46
Obrázek 23 - Měřicí pracoviště pro komplexní laboratorní zkoušky – reálné provedení .....	47
Obrázek 24 - Měřicí karta NI USB-6008.....	48
Obrázek 25 - Blokové schéma měřicí karty NI .....	48
Obrázek 26 - Rozhraní měřicího systému v prostředí Windows .....	48
Obrázek 27 - Metoda určení sériového odporu $R_s$ .....	49
Obrázek 28 - reálný průběh článku LFP 40Ah 25°C při měření vybíjecí charakteristiky a $R_s$ .....	50
Obrázek 29 - Popis parametrů dynamické odezvy napětí článku .....	51
Obrázek 30 - Dynamická odezva napětí článku pro dobu relaxace 15 min .....	52
Obrázek 31 - Dynamická odezva napětí článku pro dobu relaxace 5 min .....	53
Obrázek 32 - Uživatelské rozhraní toolboxu Curve Fitting Tool .....	55
Obrázek 33 - Výsledný aproximovaný průběh napěťové dynamické odezvy .....	56
Obrázek 34 - Vybíjecí charakteristika LFP 100Ah 25stC .....	57
Obrázek 35 - Vybíjecí charakteristika LFP 100Ah 0stC .....	57
Obrázek 36 - Vybíjecí charakteristika LFP 100Ah 40stC .....	58
Obrázek 37 - Závislost sériového odporu $R_s$ na DOD LFP 100Ah 25stC .....	58
Obrázek 38- Závislost vnitřního odporu $R_s$ na DOD LFP 100Ah 0stC .....	59
Obrázek 39 - Závislost sériového odporu $R_s$ na DOD LFP 100Ah 40stC .....	59
Obrázek 40 - Závislost dynamického odporu $R_d$ na DOD LFP 100Ah 25stC.....	60
Obrázek 41 - Závislost dynamické kapacity $C_d$ na DOD LFP 100Ah 25stC.....	60
Obrázek 42 - Závislost dynamického odporu $R_d$ na DOD LFP 100Ah 40stC.....	60
Obrázek 43 - Závislost dynamické kapacity $C_d$ na DOD LFP 100Ah 40stC.....	61
Obrázek 44 - Vybíjecí charakteristiky 25Ah 25stC.....	61
Obrázek 45 - Závislost sériového odporu $R_s$ na DOD Li-pol 25Ah .....	62
Obrázek 46 - Závislost dynamického odporu $R_d$ na DOD - Li-pol 25Ah.....	62
Obrázek 47 - Závislost dynamické kapacity $C_d$ na DOD Li-pol 25Ah 25stC .....	63
Obrázek 48 - Vybíjecí charakteristiky LFP 40Ah 25stC .....	63
Obrázek 49 - Vybíjecí charakteristiky LFP 40Ah 0stC .....	64
Obrázek 50 - Závislost vnitřního odporu $R_s$ na DOD LFP 40Ah 25stC .....	64
Obrázek 51 Závislost dynamického odporu $R_d$ na DOD LFP 40Ah 25stC .....	65
Obrázek 52 - Závislost dynamické kapacity $C_d$ na DOD LFP 40Ah 25stC.....	65
Obrázek 53 - Ilustrační fotografie experimentálního kolejového vozidla .....	67
Obrázek 54 - Blokové schéma elektrické výzbroje experimentálního kolejového vozidla.....	68
Obrázek 55 - Blokové zapojení BMS systému .....	70
Obrázek 56 - MGM Compro hlavní jednotka[2] .....	71
Obrázek 57 - MGM Compro balancér [2] .....	71
Obrázek 58 - Podrobné blokové jednopólové schéma bateriového systému vozidla.....	72
Obrázek 59 - Jednotka bateriového systému .....	75
Obrázek 60 - Detail jednotky bateriového systému.....	75



Obrázek 61 - Akumulátorové packy .....	76
Obrázek 62 - Detail balancérů .....	76
Obrázek 63 - Měřicí pracoviště na experimentálním kolejovém vozidle .....	77
Obrázek 64 - Typické napěťové a proudové průběhy sejmuté za 1 min provozu .....	77
Obrázek 65- Theveninův model s vyznačenými obvody a veličinami .....	78
Obrázek 66 - Blokové schéma simulačního modelu .....	81
Obrázek 67 - Vývojový diagram simulačního modelu .....	81
Obrázek 68 - Testovací průběh funkčnosti simulačního modelu. Zelený průběh Ri model, modrý průběh Theveninův model .....	82
Obrázek 69 - Proložení vybijecí charakteristiky článku LFP 100Ah lineární charakteristikou .....	83
Obrázek 70 - Validace laboratorních výsledků - celkový pohled .....	85
Obrázek 71 - Validace laboratorních výsledků - detail dynamické odezvy napětí .....	86
Obrázek 72 - Validace laboratorního měření - detail nepřesnosti v případě vysokého DOD ..	87
Obrázek 73 – Délkové parametry Mladějovské průmyslové dráhy [35] .....	88
Obrázek 74 - Svorkové napětí akumulátorové baterie, LFP 100Ah Mladějov na Moravě - Veksl - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model .....	89
Obrázek 75 - Svorkové napětí akumulátorové baterie, LFP 100Ah, Veksl- Nová Ves - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model .....	90
Obrázek 76 - Svorkové napětí akumulátorové baterie LFP 100Ah, Nová Ves - Veksl - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model .....	91
Obrázek 77 - Svorkové napětí akumulátorové baterie Li-pol 25Ah, Mladějov na Moravě - Veksl - modrá reálný průběh, zelená Ri model, červená Theveninův model .....	92
Obrázek 78 - Simulační model kolejového vozidla .....	96

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání konkrétních akumulátorů různých technologií[6,7,8,9] .....	24
Tabulka 2 – Přehled měřených článků [6,8] .....	40
Tabulka 3 - Sumarizace koncových teplot měřených článků .....	66
Tabulka 4 – Souhrnné výsledky validace simulačního modelu .....	93

## **Publikační činnost související s tématem disertační práce**

### **Příspěvky na tuzemských konferencích**

1. GREGORA, S., SADÍLEK, O. Elektromobilita a energetické zdroje. In Elektrotechnická zařízení v dopravě 2014. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2014, s. Neuveden. ISBN 978-80-7395-749-0.
2. SÝKORA, P., SADÍLEK, O., LELEK, T. VÝZKUM V OBLASTI APLIKACE ALTERNATIVNÍCH ENERGETICKÝCH ZDROJŮ NA DRÁŽNÍ VOZIDLA. In Elektrotechnická zařízení v dopravě. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2016, s. 1-10. ISBN 978-80-7395-970-8.
3. SADÍLEK, O. METODIKA VÝPOČTU AKUMULÁTORŮ PRO DVOUZDROJOVÉ KOLEJOVÉ VOZIDLO. In Elektrotechnická zařízení v dopravě 2014. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2014, s. Neuveden. ISBN 978-80-7395-749-0.
4. SÝKORA, P., SADÍLEK, O. Návrh fotovoltaické zdrojové soustavy akumulátorového kolejového vozidla. In XXXIV. Celostátní konference o elektrických pohonech. Praha : Česká elektrotechnická společnost, 2015, s. 1-8. ISBN 978-80-02-02592-4.
5. NOVÁK, J., KOŘÍNEK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O. Vlastnosti a odrušení výstupu frekvenčního měniče s dlouhým kabelem k motoru. In Elektrotechnická zařízení v dopravě. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2016, s. 59-67. ISBN 978-80-7395-970-8.
6. SADÍLEK, O., LELEK, T., SÝKORA, P. Možnosti nabíjení trakčních akumulátorových baterií pomocí fotovoltaických panelů. In Elektrotechnická zařízení v dopravě 2015. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 1-10. ISBN 978-80-7395-878-7.

### **Příspěvky v odborných periodikách**

1. NOVÁK, Jaroslav, Ondřej SADÍLEK a Petr SÝKORA. Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu. Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku. FCC Public, 2016, 26(1. část 11, 2. část 12). ISSN 1210-0889.

### **Příspěvky na mezinárodních konferencích**

1. LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., MLYNAŘÍK, L., SÝKORA, P. Dual source railway vehicles. In Proceedings of 25th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2015. New York : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2015, s. 56-60. ISBN 978-1-4799-8117-5.
2. SADÍLEK, O., LELEK, T., SÝKORA, P., DOLEČEK, R. Research of Alternative Energy Sources for Railway Vehicles. In Radioelektronika 2016 : conference proceedings. New York : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2016, s. 156-161. ISBN 978-1-5090-1674-7.
3. LELEK, T., LENOCH, V., LETTL, J., SADÍLEK, O., SCHEJBAL, V., SÝKORA, P. Windowing effect on electromagnetic interference and efficiency at using pulse width

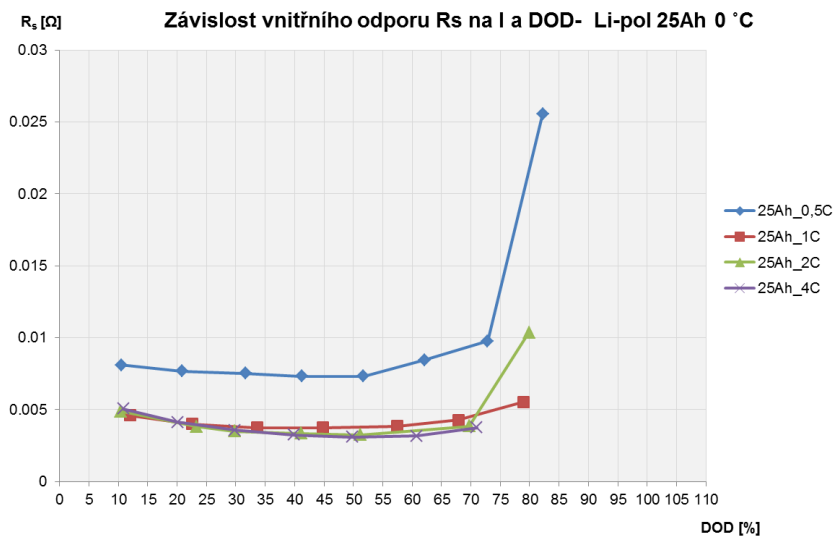
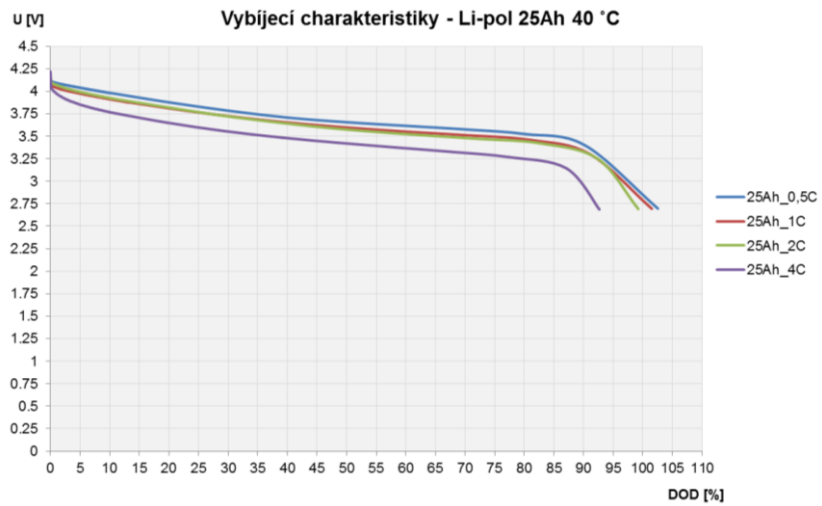
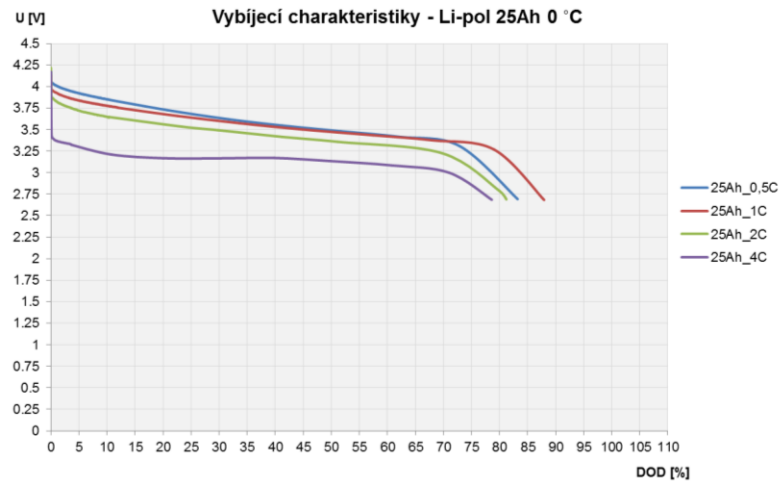
- modulation techniques. In PIERS 2015 Prague: Proceedings. Cambridge : The Electromagnetics Academy, 2015, s. 2731-2735. ISBN 9781934142301. ISSN 1559-9450.
4. LELEK, T., SCHEJBAL, V., SADÍLEK, O. Dual source railway vehicles. In PIERS 2015 Prague: Proceedings. Cambridge : The Electromagnetics Academy, 2015, s. 1115-1119. ISBN 9781934142301. ISSN 1559-9450.
  5. MLYNAŘÍK, L., LELEK, T., SADÍLEK, O., ČERMÁK, D., NOVÁK, J. ENERGETICKÉ PŘÍNOSY JÍZDY DVOUZDROJOVÉHO VOZIDLA S PROMĚNNÝM POČTEM TRAKČNÍCH MOTORŮ. In SEKEL 2016. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2016, ISBN 978-80-214-5395-1.
  6. SADÍLEK, O., LELEK, T., KOŘÍNEK, J. Interfering Influences on Electrical Cable between Frequency Converter and Electric Motor. In Radioelektronika 2016 : conference proceedings. New York : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2016, s. 150-155. ISBN 978-1-5090-1674-7.
  7. SADÍLEK, O. The Modern Storages of Electric Energy For Traction Applications. In 6th International Scientific Conference: Conference Proceedings. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 452-460. ISBN 978-80-7395-924-1.
  8. SADÍLEK, O., LELEK, T., SÝKORA, P. Aktivity v oblasti akumulátorového napájení dopravních prostředků. In SEKEL 2014 mezinárodní konference učitelů elektrotechniky. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014, s. 60-71. ISBN 978-80-213-2480-0.

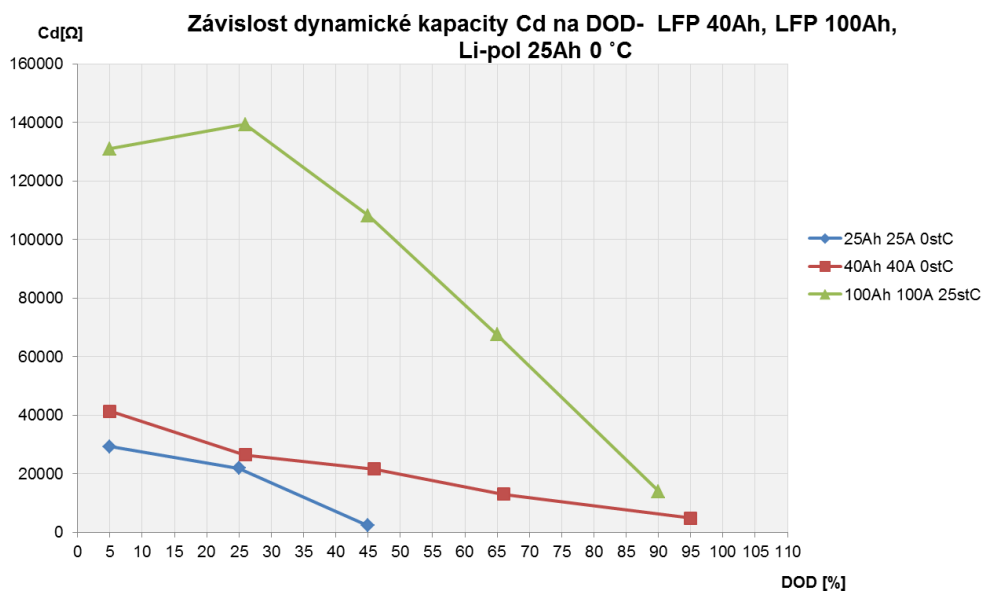
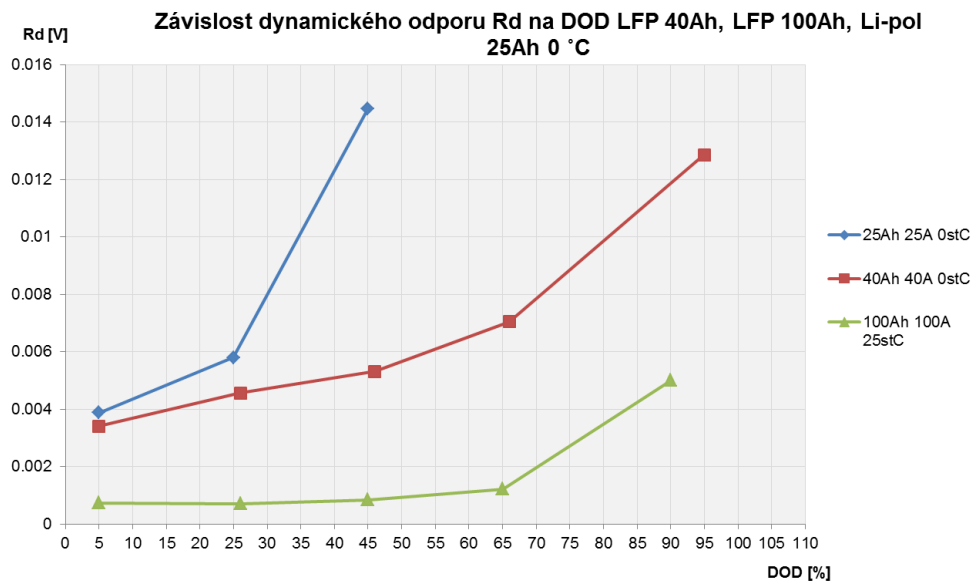
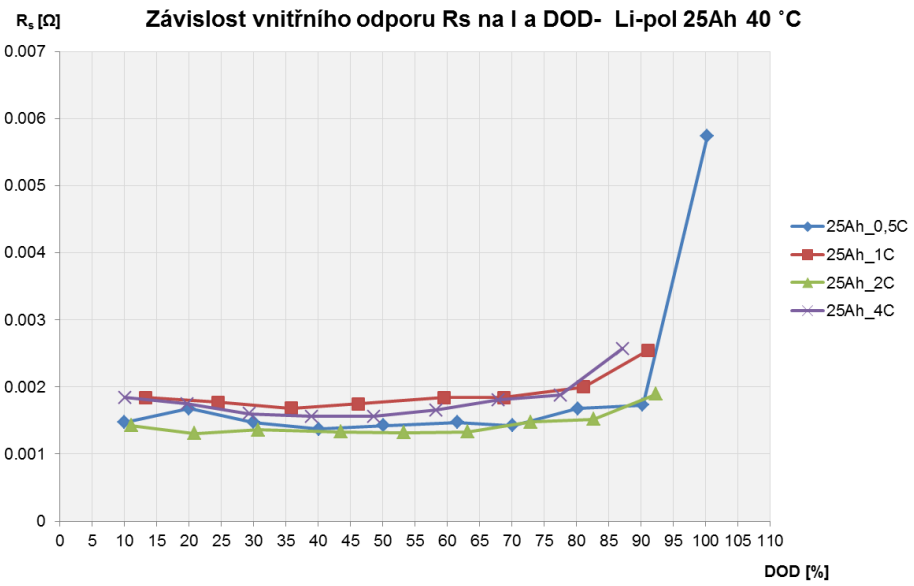
#### **Výzkumné zprávy a ostatní**

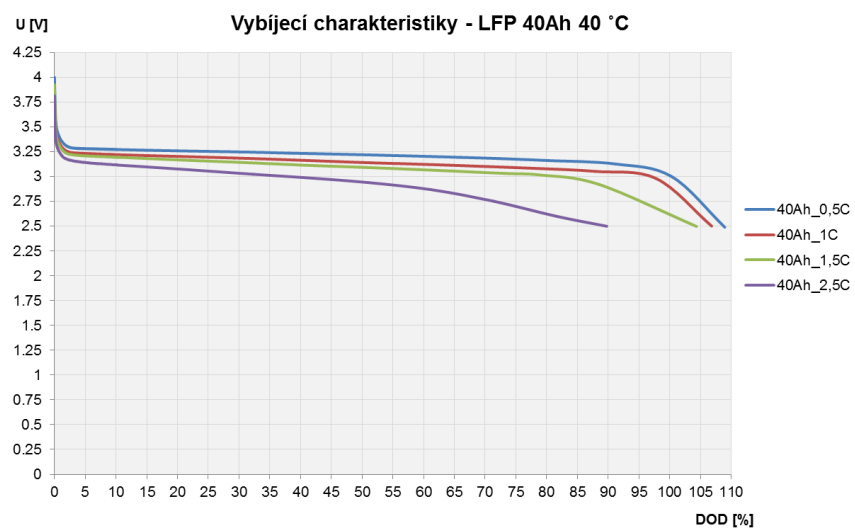
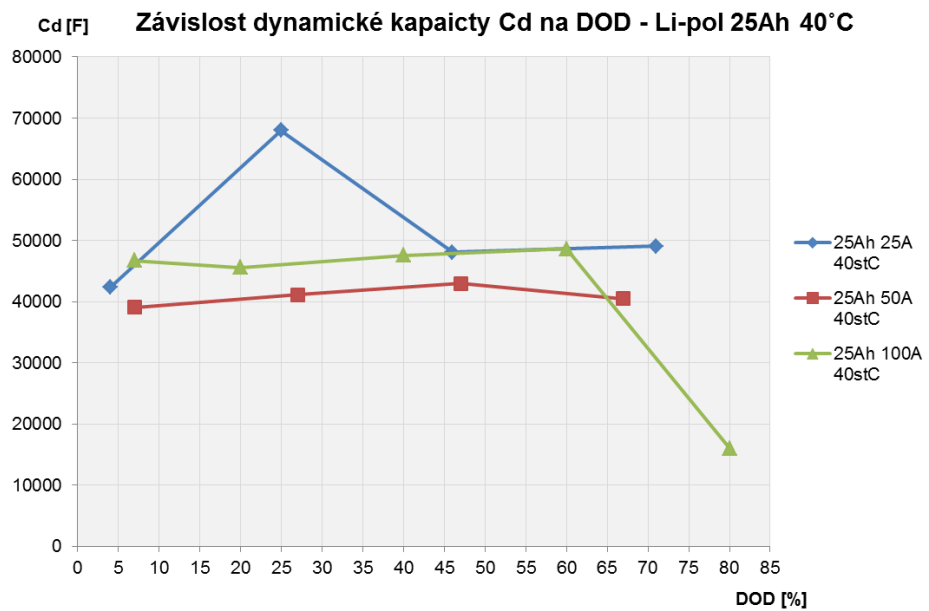
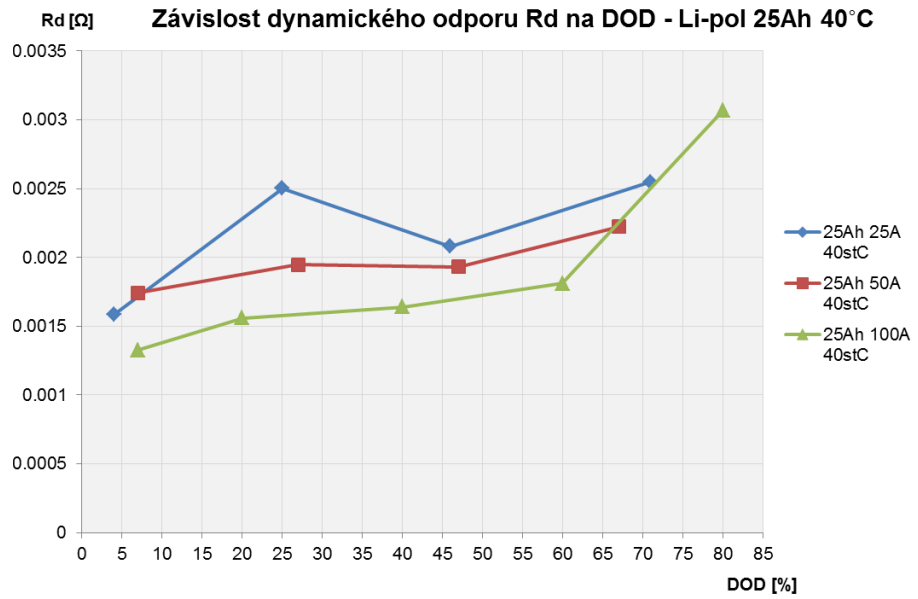
1. NOVÁK, J., LENOCH, V., MLYNAŘÍK, L., MAŠEK, Z., SADÍLEK, O. Sériové hybridní pohony pro drážní vozidla. Neuveden, 2015.128 s.
2. NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., SADÍLEK, O., LELEK, T. Možnosti využití hybridizovaných jednotek ř. 440 a ř. 640 s akumulátory High Energy. 2015.
3. MLYNAŘÍK, L., NOVÁK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., SÝKORA, P. Výchozí studie provozu dvouzdrojových kolejových vozidel v Jihomoravském kraji. 2013.
4. MLYNAŘÍK, L., NOVÁK, J., LELEK, T., SADÍLEK, O., DOLEČEK, R., MAŠEK, Z. Studie možnosti provozu dvouzdrojových vozidel v Jihomoravském kraji. KORDIS JMK, a.s., 2014.140 s.
5. NOVÁK, J., MLYNAŘÍK, L., SADÍLEK, O., LELEK, T. Analýza využitelnosti hybridizovaných jednotek ř. 440 a ř. 640 v podmínkách železniční sítě ČR. 2015.
6. DRDLA, P., BULÍČEK, J., CEMPÍREK, V., ČERNÝ, O., DOLEČEK, R., DVOŘÁK, K., HÁBA, A., HRUBAN, I., JEŽEK, J., KUČERA, T., KUDLÁČKOVÁ, N., LATA, M., LELEK, T., MACHALÍK, S., MATUŠKA, J., MICHÁLEK, T., MLYNAŘÍK, L., NACHTIGALL, P., NOVÁK, J., NOVÁK, P., SADÍLEK, O., ŠIROKÝ, J., ŠVADLENKA, L. Názvoslovná norma pro oblast provozování dráhy. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2016.145 s.

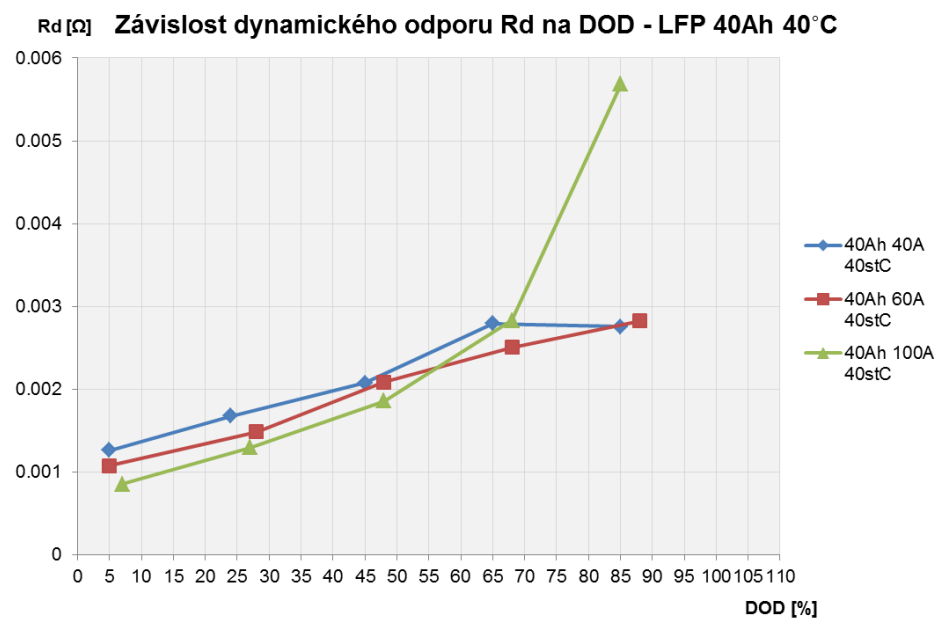
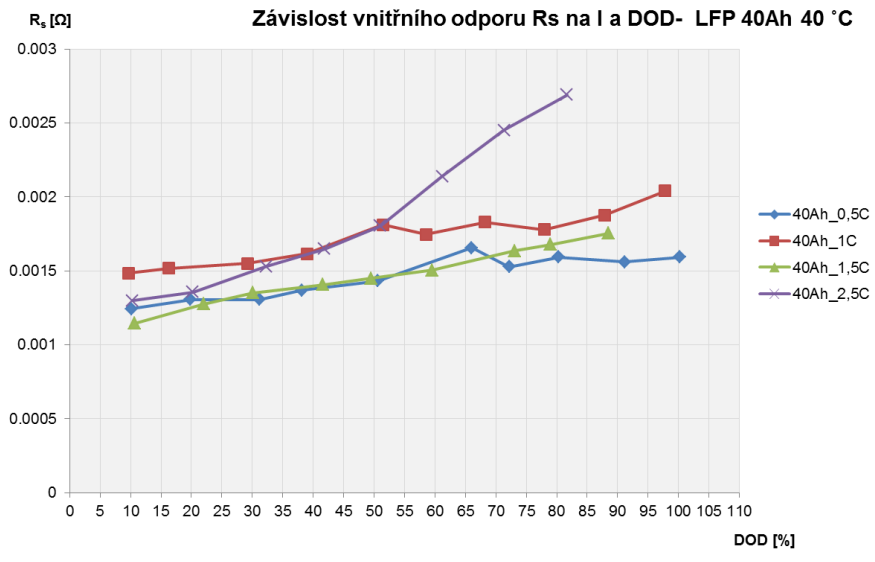
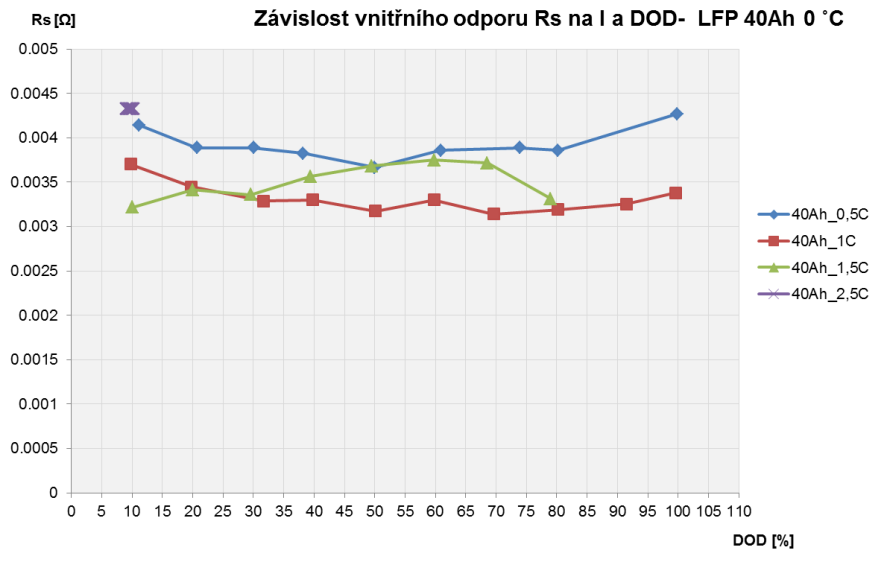
## Přílohy

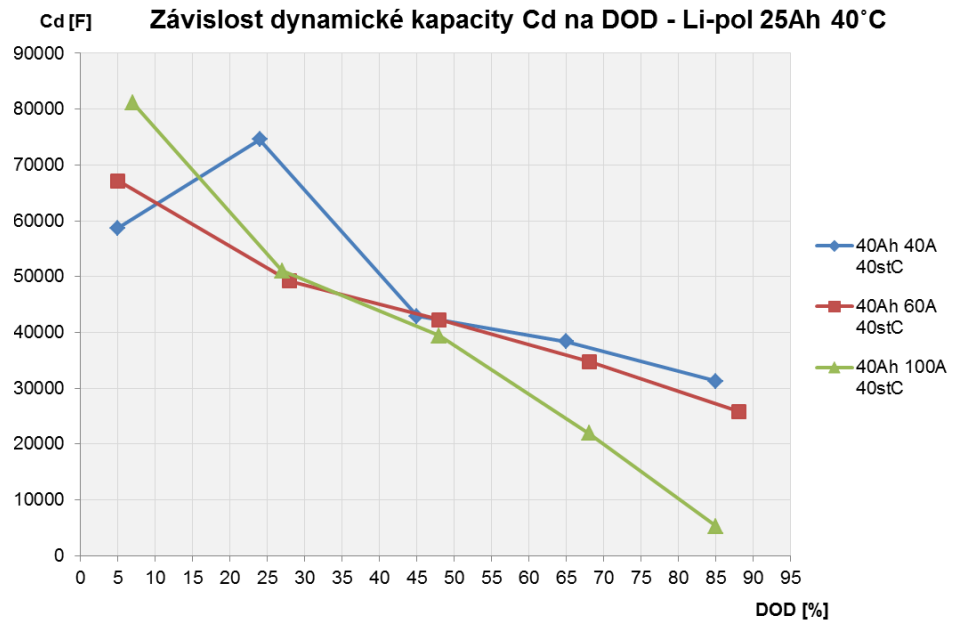
- Měřené charakteristiky článků











- **Výpis programu simulačního modelu článku v prostředí Matlab**

```

nLFP=28; %pocet clanku LFP
n=28;
cas=1:t;
Iprevious=0;
pom=0;
Ucpom1=0;
Ucpom2=0;
Uc=0;
Pomlindicator=1;
Ud0=0;
Ucell = zeros(10,1);
Relaxtime=1;
EnergylastRC=0;
EnergylastRi=0;
EnergylastReal=0;
Timelast=0;
EnergyloseslastRd=0;
EnergyloseslastRs=0;
EnergyloseslastRd_Ri=0;
Stepindicator=0;
DOD_alternative_cell=0;
W_alternative_cell=92.5; %Wh

for i=1:t

    %vypocet DOD - pokud není znamo z logu
    %DOD(i)=DOD_alternative_cell;

    Time(i)=Timelast;
    Timelast=Time(i)+t1c;

    OCV=OpencircuitvoltageLFP(DOD(i));
    Rs=RseriesLFP(DOD(i));

```



```

Rd=RdynamicLFP(DOD(i));
Cd=CdynamicLFP(DOD(i));

%OCV=OpencircuitvoltageLipol(DOD(i));
%Rs=RseriesLipol(DOD(i));
%Rd=RdynamicLipol(DOD(i),Itraction(i));
%Cd=CdynamicLipol(DOD(i));

%Rs=0.001;
%Rd=0.001;

tau=Rd*Cd;

Idelta=Itraction(i)-Iprevious;

if Idelta>0 % zvsujici se trakcni odber, U klesa

    if Stepindicator==0
        if Pomlindicator==1
            Uc=Ucpom1
            Ucpom1=0;
            Ud0=0;
        else
            Uc=Ucpom2
            Ucpom2=0;
            Ud0=0;
        end
    end
end

if Stepindicator==1
    Uc=Ud0;
end

Us=Rs*Itraction(i);
Udmax=Rd*Itraction(i);
Ud=Udmax*(1-exp(-1/tau));
U0=Uc*exp(-1/tau);
Ucell(i)=OCV-Us-Ud-U0;

pom=1; %indikace zvsujiciho se odebru

Relaxtime=1;
Ud0=Ud+U0;
Ucapacitor(i)=Ud0;
Stepindicator=1;

end

if Idelta<0 %snizujici se trakcni odber, U roste

    if Stepindicator==0
        if Pomlindicator==1
            Uc=Ucpom1
            Ucpom1=0;
            Ud0=0;
        else
            Uc=Ucpom2

```

```

        Ucpom2=0;
        Ud0=0;
    end
end

if Stepindicator==1
    Uc=Ud0;
end

Us=Rs*Itraction(i);
Udmax=Rd*Itraction(i);
Ud=Udmax*(1-exp(-1/tau));
U0=Uc*exp(-1/tau)
Ucell(i)=OCV-Us-Ud-U0;

pom=2; %indikace snizujiciho se odebru

Relaxtime=1;
Ud0=Ud+U0;
Ucapacitor(i)=Ud0;
Stepindicator=1;
end

if Idelta==0 % trakcni odber stejny
    %je nutno zjistit, zda ustalenemu stavu
    %predchazelo snizovani ci zvysovani proudu

    Relaxtime=Relaxtime+1;

    if pom==1

        Us=Rs*Itraction(i);
        Udmax=Rd*Itraction(i);
        Ud=Udmax*(1-exp(-Relaxtime/tau));
        U0=Uc*exp(-Relaxtime/tau)
        Ucell(i)=OCV-Us-Ud-U0

        Ucpom1=Ud+U0;
        Pomlindicator=1;
        Ucapacitor(i)=Ucpom1;
        Stepindicator=0;
    end

    if pom==2

        Us=Rs*Itraction(i);
        Udmax=Rd*Itraction(i);
        Ud=Udmax*(1-exp(-Relaxtime/tau));
        U0=Uc*exp(-Relaxtime/tau);

        Ucell(i)=OCV-Us-Ud-U0;
        Ucpom2=Ud+U0;
        Pomlindicator=0;
        Ucapacitor(i)=Ucpom2;
        Stepindicator=0;

    end

    if pom==0

        Ucell(i)=4;
    end
end

```

```

end

end

Iprevious=Itraction(i);

UcapacitorXn(i)=Ucapacitor(i)*n;

EnergylosesRd(i)=n*((abs(Ucapacitor(i))*abs(Ucapacitor(i))/Rd)*t1c)/
3600000)+EnergyloseslastRd;
EnergyloseslastRd=EnergylosesRd(i);

EnergylosesRs(i)=n*((abs(Itraction(i))*abs(Itraction(i)))*Rs)*t1c)/36
00000)+EnergyloseslastRs;
EnergyloseslastRs=EnergylosesRs(i);

EnergylosesRd_Ri(i)=n*((abs(Itraction(i))*abs(Itraction(i)))*Rd)*t1c)
/3600000)+EnergyloseslastRd_Ri;
EnergyloseslastRd_Ri=EnergylosesRd_Ri(i);

UcellXn(i)=Ucell(i)*n;

EnergyRC(i)=((Itraction(i)*UcellXn(i))*t1c/3600000)+EnergylastRC;
%Ws
EnergylastRC=EnergyRC(i);

DOD_alternative_cell=100-((n*W_alternative_cell-
(EnergylastRC*1000))/(n*W_alternative_cell))*100;

Ucell_ri(i)=OCV-(Rs+Rd)*Itraction(i);
Ucell_riXn(i)=Ucell_ri(i)*n;

EnergyRi(i)=((Itraction(i)*Ucell_riXn(i))*t1c/3600000)+EnergylastRi; %Ws
EnergylastRi=EnergyRi(i);

UrealXn(i)=Ureal(i)*nLFP*1.0022656;

EnergyReal(i)=((Itraction(i)*UrealXn(i))*t1c/3600000)+EnergylastReal;
EnergylastReal=EnergyReal(i);

end;

plot(Time,UrealXn,Time,Ucell_riXn,Time,UcellXn);

```

- Aproximace dynamické odezvy článků v prostředí CF Tool

