



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DIGITÁLNÍ DVOJČE LI-ION AKUMULÁTORU

DIGITAL TWIN OF THE LI-ION BATTERY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Šibor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2025



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Vojtěch Šibor

ID: 229952

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Digitální dvojče Li-Ion akumulátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s pojmem digitální dvojče a proveďte rešerši jeho použití v bateriových systémech Li-Ion. Seznamte s prostředím ANSYS Fluent a Twin Builder. Zaměřte se na HPPC měření vybraného Li-Ion článku a připravte impulsové charakteristiky pro fitování na ECM model. Připravte redukovaný teplotní model a oba modely propojte. Navrhněte testovací algoritmus, změřte teplotní a napěťové odezvy, proveďte validaci a verifikaci modelů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 27.5.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této práce je objasnit pojem digitální dvojče a jeho přínos v oblasti bateriových úložišť. Prezentován je způsob měření akumulátoru, jenž se nazývá hybridní pulzní charakterizace výkonu (HPPC). Text pokračuje zpracováním dat a jak prostřednictvím fitování v softwaru Ansys Twin Builder vytvořit náhradní obvod baterie (ECM). Dále je vytvořen redukovaný model tepla (LTI ROM) pomocí softwaru Ansys Fluent. Kombinací obou modelů je vytvořeno digitální dvojče, které je validováno a verifikováno fyzicky naměřenými hodnotami užitím testovacího profilu. Práci uzavírá predikce stárnutí lithium-iontového akumulátoru.

Klíčová slova

Digitální dvojče, Li-Ion akumulátor, HPPC, LTI ROM, Ansys Twin Builder

Abstract

This paper aims to describe the concept of a digital twin and its significance in the field of battery storage. First, a battery measurement method called hybrid pulse power characterization (HPPC) is presented. Secondly, there is an explanation of data processing and how to create a battery equivalent circuit (ECM) using a fitting method in Ansys Twin Builder. Thirdly, a reduced thermal model (LTI ROM) is created using Ansys Fluent. By combining both models, a digital twin is created. It is verified and validated by experimental measurements using a testing profile. Finally, the prediction of lithium-ion battery ageing is presented.

Keywords

Digital twin, Li-Ion battery, HPPC, LTI ROM, Ansys Twin Builder

Bibliografická citace

ŠIBOR, Vojtěch. *Digitální dvojče Li-Ion akumulátoru*. Online, diplomová práce. Petr VYROUBAL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168657>. [cit. 2025-05-20].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Bc. Vojtěch Šibor</i>
VUT ID studenta:	229952
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	2024/25
Téma závěrečné práce:	<i>Digitální dvojče Li-Ion akumulátoru</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2025

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D., za laskavé vedení diplomové práce, za předání všech vědomostí, zkušeností, konzultace a odbornou pomoc. Také děkuji za poskytnutí potřebných naměřených dat umožňujících zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 27. května 2025

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. DIGITÁLNÍ DVOJČE.....	12
1.1 VYMEZENÍ POJMU.....	12
1.2 VÝHODY DIGITÁLNÍHO DVOJČETE	13
1.3 VYUŽITÍ DIGITÁLNÍCH DVOJČAT V BATERIOVÝCH SYSTÉMECH LI-ION A V PRŮMYSLU	13
2. PŘÍPRAVA TVORBY DIGITÁLNÍHO DVOJČETE AKUMULÁTORU	21
2.1 ANSYS TWIN BUILDER	21
2.2 MĚŘENÍ HPPC DAT	21
2.3 NÁHRADNÍ ELEKTRICKÝ OBVOD BATERIE.....	26
2.4 REDUKOVANÉ MODELY A LTI ROM	31
2.5 PŘENOS DAT V REÁLNÉM ČASE.....	33
2.6 HODNOCENÍ KVALITY MODELU	34
3. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	36
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
4.1 POSTUP TVORBY DIGITÁLNÍHO DVOJČETE.....	37
4.2 MĚŘICÍ PROFIL.....	39
4.3 ZPRACOVÁNÍ DAT	40
4.4 VYTVOŘENÍ ECM MODULU	45
4.5 MODEL TEPLA – ANSYS FLUENT	48
4.5.1 <i>Verifikace a kalibrace modelu tepla</i>	52
4.5.2 <i>Validace modelu tepla</i>	55
4.5.3 <i>Redukovaný model tepla</i>	59
4.6 DIGITÁLNÍ DVOJČE AKUMULÁTORU.....	61
4.7 TESTOVACÍ PROFIL	62
4.8 STÁRNUTÍ AKUMULÁTORU	65
4.9 SHRNUTÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI	68
5. ZÁVĚR.....	69
LITERATURA.....	71
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Komunikace mezi digitálním dvojčetem s bateriovým úložištěm	14
1.2	Shromažďování dat vibrací větrné elektrárny [15]	16
1.3	Digitální dvojče ropné plošiny [21]	17
1.4	Digitální dvojče výrobní linky [24]	19
2.1	Naměřené hodnoty statické kapacity a HPPC dat	24
2.2	SoC pro 10 až 90 %	25
2.3	Poznámkový blok s příkladovými daty pro SoC 60 %	26
2.4	Náhradní elektrický obvod baterie [34]	27
2.5	Bloky představující ECM v softwaru Ansys Twin Builder [35]	27
2.6	Průběh vybíjecího impulsu převzato z [34] a upraveno	28
2.7	Vstupy a výstupy pro LTI ROM [39]	33
4.1	Blokový diagram postupu tvorby digitálního dvojčete	37
4.2	Zadání proudů pro první polovinu HPPC dat	39
4.3	Vývojový diagram	40
4.4	Příklad naměřených dat	41
4.5	Configuration Tool	45
4.6	Závislost napětí na čase pro fit a naměřená data při 30 % SoC	46
4.7	Schéma zapojení pro měření napětí	47
4.8	Závislost napětí na čase pro porovnání fitovaných a naměřených dat	47
4.9	Simulace teploty v Ansys Fluent	52
4.10	Průřez akumulátorem 18650 a rozměry nové 3D geometrie [44][45]	53
4.11	Detail poklesu napětí při 40 % SoC před a po úpravě	54
4.12	Výsledek simulace časových kroků	55
4.13	Měření teploty akumulátoru	56
4.14	Teplota v klimatické komoře	57
4.15	Filtr naměřeného průběhu teploty	57
4.16	Porovnání naměřených a simulovaných dat pro tři teploty	58
4.17	Porovnání naměřených a simulovaných dat pro teplotu 23,5 °C	58
4.18	Schéma zapojení digitálního dvojčete	61
4.19	Znázornění propojení digitálního dvojčete a akumulátoru	62
4.20	Průběh proudu testovacího profilu	63
4.21	Porovnání napětí testovacího profilu a naměřených dat	64
4.22	Porovnání teploty testovacího profilu a naměřených dat	64
4.23	Teplota v klimatické komoře	65
4.24	Schéma zapojení digitálního dvojčete pro predikci stárnutí	67
4.25	Schéma nastavení parametrů predikce stárnutí	67
4.26	Porovnání naměřených a predikovaných dat Li-Ion akumulátoru	68

SEZNAM TABULEK

2.1	Metody měření Li-Ion akumulátorů.....	22
4.1	Vlastnosti materiálů akumulátoru [43]	49
4.2	Vlastnosti aktivního materiálu	51
4.3	Vlastnosti obalu akumulátoru	53
4.4	Nastavení parametrů pro vytvoření trénovacích dat	60
4.5	Parametry akumulátoru Samsung INR18650-35E.....	66

ÚVOD

Současným trendem je implementace virtualizace do vývoje nových produktů a systémů v nejrůznějších odvětvích. Ať už se jedná o využití v průmyslu elektrotechnickém, automobilovém, energetice, stavebnictví nebo letectví, přínosem nejnovějších nástrojů je flexibilita, zkrácení doby uvedení do provozu, plánování údržby, zlepšení výkonu a predikce zbývající životnosti. Průmysl 4.0 je vizí digitalizace, automatizace a propojení virtuálních a fyzických systémů. Právě pod tento pojem digitální dvojče spadá. Smysl Průmyslu 4.0 spočívá v transformaci výroby ze samostatných automatizovaných jednotek na plně propojená a v reálném čase optimalizovaná výrobní prostředí, tzv. inteligentní továrny. V nich práci vykonávají roboti, kteří komunikují a činí autonomní rozhodnutí (decentralizace) a kolaborativní roboti pracující po boku lidí v částečně automatizované montáži. Výrobní zařízení propojuje kyberneticko-fyzikální síť, ve které má každý výrobek svůj virtuální obraz, uchovávající jeho klíčové vlastnosti a historii provedených procesů. Informace o výrobcích jsou zpracovávány a ukládány. Inteligentní továrna je schopna v reálném čase pružně reagovat na okamžitou a měnící se poptávku po produktech a také reagovat na individuální požadavky zákazníků a požadované produkty efektivně vyrobit [1].

Zdroji dat v inteligentních továrnách jsou data z provozu na internetu, data z různých čidel sledující výrobní a logistické procesy, inteligentních senzorů a měřicích sítí, satelitního pozorování, lékařských obrazových systémů, genových analyzátorů nebo bezpečnostních kamer (Big Data). Z hlediska propojení s konceptem Internetu věcí (IoT) je klíčovým cílem analýza dat z tzv. paměti výrobků. V praxi se takto získané informace využívají například v průmyslu, kde slouží k optimalizaci výkonu, výroby, souvisejících služeb, podpůrných činností nebo distribuce. Analýza velkých dat obsahující údaje o aktuální spotřebě energie, opotřebení, prostojích a podobně, pomáhá zvyšovat dostupnost materiálu dle potřeby výroby a snižovat náklady na údržbu, v oblasti energetiky přispívá k predikci možných závad, nebezpečných výkyvů a k navrhování hospodárných opatření. Analýza velkých dat je typickou disciplínou, která není příliš náročná na materiálové zdroje, vyžaduje výkonnou počítačovou techniku zapojenou do rychlých počítačových sítí, naopak je velmi náročná na lidské zdroje, přičemž odborných analytiků je bohužel stále velký nedostatek. Schopnost získávat praktické informace a znalosti z těchto dat je tak mnohdy velmi omezená

a většina takových znalostí zůstává obsažena v datech bez jakéhokoliv využití. To je v současnosti příčinou narůstajícího tlaku na vývoj spolehlivých metod strojového učení pro zapojení umělé inteligence [1].

Digitální dvojče tak jako předchozí příklady využívá moderních technologií pro monitoring a regulaci zařízení formou digitalizace. Mezi prvními kdo veřejně představili myšlenku dvojčete byl doktor Michael Grieves [2]. Na Michiganské univerzitě v roce 2002 přednášel o konceptu propojení reálného a digitálního systému během celého životního cyklu. Později téhož roku byl koncept zařazen do výuky pod názvem Mirrored Spaces Model (Model zrcadlených prostorů) [3]. Avšak nynější název digitální dvojče byl poprvé použit až v roce 2010 v dokumentu NASA, pojednávajícím o budoucích technologických výzvách [2][4].

V minulých letech pokročil vývoj digitálních dvojčat rychle kupředu, mezi průkopnické společnosti patří například Siemens AG, General Electronics, ale také Letectvo Spojených států amerických [5]. Po roce 2017 se na trhu začaly objevovat komerční softwary navržené přímo pro jejich tvorbu. Jedním z těchto specializovaných softwarů je Twin Builder společnosti Ansys. Tento program dokáže tvořit dvojčata například motorů, turbín, čerpadel nebo pohonných jednotek elektromobilů. Mimo zmíněné sem též patří bateriové systémy, na které se tato práce zaměřuje. Lithium-iontové akumulátory mají velký význam v sektoru energetiky. S tendencí minimalizovat negativní dopady na životní prostředí se investují značné finanční prostředky a čas do vývoje obnovitelných zdrojů. Jenže ty se bez úložišť energie neobejdou, lze tedy říci, že bateriové systémy zde jednoznačně mají své opodstatnění, a proto je žádoucí hlubší pochopení a zdokonalování jejich provozu, s čímž právě digitální dvojčata dokáží pomoci.

1. DIGITÁLNÍ DVOJČE

Tato kapitola se věnuje definici digitálního dvojčete a jeho přednostem. Na konkrétních příkladech demonstruje jeho nasazení v průmyslu.

1.1 Vymezení pojmu

Digitální dvojče je virtuální reprezentace fyzického systému, jehož účelem je chování fyzického systému kopírovat. Přidanou hodnotou oproti běžné simulaci je schopnost dvojčete komunikovat a vzájemně se ovlivňovat s fyzickou částí prostřednictvím výměny dat. Tato synchronizace v reálném čase společně s daty z minulosti napomáhá predikovat poruchy a namáhání fyzického systému. Díky vzájemnému propojení je možné na digitální verzi také odhalit poruchu, kterou senzory na fyzickém systému nejsou schopny zachytit. Následuje vyhodnocení optimalizace pro její prevenci v budoucnosti a na základě zjištěných poruch je naplánován servis a stanovena životnost systému [6]. Toto je charakteristika dvojčete, tak jak je na něj nahlíženo v této práci, tedy vytvoření digitálního dvojčete pro finální a funkční fyzický systém, který dokáže předpovídat stavy v budoucnosti a obě části se dokáží vzájemně ovlivňovat.

U různých výrobců či v akademických pracích se lze setkat s koncepty, které jsou digitálnímu dvojčeti méně i více podobné. Jedná se o simulace, které jsou rozšířeny o prvky a funkce digitálního dvojčete a právě proto částečně sdílí jeho název. Digital twin instance je označení pro dvojče tak, jak bylo výše popsáno, avšak v tomto případě se jedná o vytvoření dvojčete již na začátku výroby. Počínaje shromažďováním dat o výrobních procesech, přes monitoring v reálném čase, až po predikci budoucích stavů. Doprovází tedy systém během celého životního cyklu [2].

Dalším příkladem je Digital twin prototype. Virtuální model je vytvořen jako první a je prototypem pro budoucí fyzický systém. Obsahuje charakterizující data a informace nezbytné pro proces výroby. Ve virtuálním prostředí je odsimulováno, zda je systém možné vyrobit a jestli jsou dostupné potřebné technologie, následně je provedeno testování kvality a validace funkčnosti, případně i destruktivní testování. Jakmile prototyp splňuje veškeré požadavky je uveden do výroby. Mezi často používanými pojmy lze ještě najít termín digitální stín, do virtuálního prostředí jsou automaticky přiváděna data z fyzického systému, na základě kterých se stín aktualizuje,

ale nedochází už ke zpětnému přenosu dat a ovlivňování systému fyzického. A nakonec simulace, která je vytvořena bez automatického přenosu dat, je nazývána digitálním modelem [2].

1.2 Výhody digitálního dvojčete

K fyzickému systému jsou připojeny senzory a čidla, ze kterých se data v reálném čase přenášejí do digitálního dvojčete. Díky těmto datům je virtuální verze updatována a odpovídá aktuální podobě reálného systému. Proto dokáže digitální dvojče detekovat poruchy v reálném čase a tedy umožňuje rychlou reakci. A co víc, na základě shromážděných dat v cloudových úložištích dokáže předpovídat poruchy, které by v budoucnu mohly nastat. Aby se poruchám předešlo, jsou včas plánovány odstávky a údržba. Taktéž je možné na základě dat optimalizovat výkon, zefektivnit proces oprav a snížit počet prostojů [6].

Dalším velkým pozitivem je vzdálený přístup. To ve většině případů znamená správu z centrálního místa, z čehož vyplývá méně návštěv a tím i úspora finančních nákladů. S tím se pojí vyšší míra bezpečnosti, například u ropných plošin, které jsou rizikovým prostředím a je žádoucí snížit výskyt přítomných osob [6].

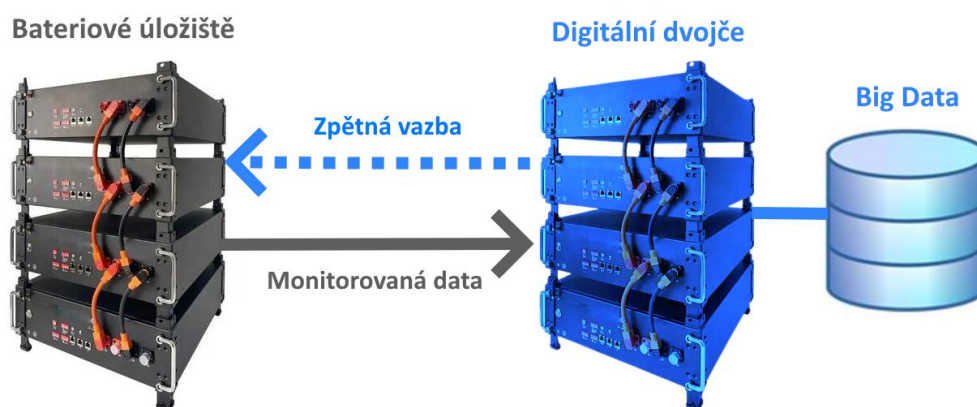
Schopnost predikce také pomáhá při analyzování zátěžových stavů, kdy se namáhání systému odsimuluje na synchronizovaném digitalizovaném modelu a negativní dopady se nepromítnou na fyzický systém. Popsaný proces umožňuje zdokonalení provozu a identifikaci potenciální oblasti pro zlepšení a z množství nasbíraných dat lze vycházet při návrhu nových systémů [6]. I přes veškeré zmíněné výhody se rozumné uplatnění nenajde vždy, cena softwaru pro výrobu i samotného provozu digitálního dvojčete je vysoká, proto se jejich aplikace vyplatí pouze pro nákladné projekty nebo zařízení s požadavky na mimořádnou kvalitu.

1.3 Využití digitálních dvojčat v bateriových systémech Li-Ion a v průmyslu

Digitální dvojčata se používají v bateriových systémech Li-Ion a mnoha průmyslových odvětvích, tato podkapitola se však soustředí především na oblast elektrotechniky a energetiky.

Využití v bateriových systémech Li-Ion - Výroba elektrické energie se přesouvá z předvídatelných a stabilních zdrojů k méně předvídatelným a stabilním, jako jsou obnovitelné zdroje energie. Pro tyto účely jsou často v různých aplikacích, před jinými typy akumulátorů, upřednostňovány bateriové systémy Li-Ion díky vysoké hustotě energie, dlouhé životnosti, malému samovybití, vysokému jmenovitému napětí a relativně nízké hmotnosti [7][8]. Ojedinele však může dojít k významným bezpečnostním rizikům, tato rizika mohou poškodit Li-Ion bateriový systém i jeho okolí. Proto je důležité mít technologii, která umožňuje přesnou detekci a diagnostiku poruch. Spolehlivost a bezpečnost lze zlepšit pomocí digitálních dvojčat [7][9].

Pro vytvoření digitálního dvojčete neexistuje žádný předepsaný formát. Základní myšlenka návrhu však zůstává konzistentní, jde o kombinaci fyzického a digitálního systému spolu s komunikací v reálném čase [9]. Při návrhu je nutné počítat se vstupními veličinami, tedy napětím, proudem a teplem, které bateriová úložiště při provozu vytvářejí. V celém životním cyklu akumulátoru je pak možné sledovat provozní charakteristiky jako je stav nabití, pokles životnosti a predikce poruch s podporou analýzy velkých dat. Digitální dvojčata inženýrům pomáhají s řešením chlazení systému a optimalizací pro různé provozní scénáře [7]. Kromě stacionárních úložišť jsou lithium-iontové baterie frekventovaně využívány i v mobilních aplikacích, kupříkladu u letadel, kosmické techniky a elektromobilů [10][11].



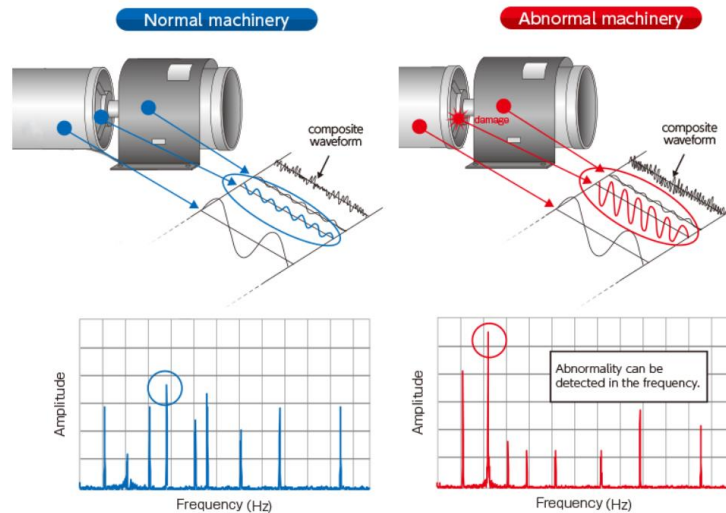
Obrázek 1.1 Komunikace mezi digitálním dvojčetem s bateriovým úložištěm

Elektromobilita - Digitální dvojčte nachází uplatnění při preventivní údržbě vozidla, kdy na základě včasných oprav nedochází k eskalaci poruch [12]. Dále shromažďuje data z elektromobilů provozovaných v různých podmínkách, kdy pomáhá analyzovat profil jízdy, odesílá data o baterii do cloudu vypočítávajícího matematické operace k předpovědi kondice baterie (SoH - State of Health), tedy poměru aktuální kapacity akumulátoru ku celkové katalogové kapacitě. Cílem je poskytnout majiteli elektromobilu a výrobcí včasnou zpětnou vazbu týkající se stavu baterie. Metoda výpočtu SoH pomocí cloudů snižuje potřebu výpočetního výkonu a paměti instalované ve vozidle a odpadá nutnost přidávání dalších elektronických obvodů do elektromobilu [13]. Jízdní modely jsou generovány s ohledem na vnější i vnitřní vlivy tak, aby bylo dosaženo co nejvyváženější spotřeby energie, čímž je dosaženo kýženého zvýšení dojezdu. Na spotřebu energie mají dopad i teplotní změny, jejich regulace snižuje náklady na údržbu a prodlužuje životnost akumulátoru.

V neposlední řadě je možné digitální dvojčte použít při výběru vhodného typu elektromotoru. Ať už jde o bezkartáčové stejnosměrné nebo synchronní motory s permanentními magnety různého výkonu. Stejná vozidla jsou vybavena různými typy motoru a prochází identickou zátěžovou jízdou. Akcelerace i brzdění jsou automaticky ovládány přesným řídicím blokem PID regulátorů, aby byly zajištěny totožné zátěžové podmínky. Digitální dvojčte zpracovává data a na základě stavu akumulátoru určí nejvhodnější motor. Podpora elektromobility je jedním ze současných politických cílů, což zvyšuje poptávku po nasazování digitálních dvojčat při vývoji vozidel i akumulátorů [12].

Větrné elektrárny - Aplikace digitálních dvojčat u větrných elektráren na moři se neomezuje pouze na součásti související s turbínami, jako jsou lopatky a motory, ale zahrnuje také celé systémy, jako je řízení úhlu sklonu, kotvicí systém, převodovka, ložiska a nosná konstrukce. Digitální dvojčte se zde využívá za účelem pochopit probíhající mechanizmy vnitřních struktur a k zabránění poruchám. Na základě dat lze plánovat údržby a činit vhodná rozhodnutí při vzniku problémů. Opravy elektráren mimo pevninu jsou nákladné, jelikož technici musejí být na místo dopraveni vrtulníkem. Kromě sledování motorů, které mají za úkol směřovat gondolu proti větru je další používanou metodou odhalování anomálií na základě vibračních ložisek větrných

turbín. K rozboru shromážděných dat vibrací se používá rychlá Furierova transformace, jak symbolizuje obrázek 1.2. Dvojčata také pomáhají s řízením systémů náklonu úhlu lopatek turbíny [14].



Obrázek 1.2 Shromáždění dat vibrací větrné elektrárny [15]

Vodní elektrárny - Základem je dynamické modelování jednotlivých částí systému jako je přívodní kanál, turbína, generátor a připojení k rozvodné síti [16]. Digitální dvojčata napomáhají například analyzovat turbulentní proudění v komoře turbíny. Při konstrukci digitálního modelu dvojčete jsou jako zásadní vstupní data považována hladina vody v nádrži, rychlost turbíny a napětí na generátoru. Zároveň je důležitá spojitost mezi hladinou vody a vyrobenou energií. Z výstupů se pak stanovuje výkon a účinnost elektrárny [17].

Fotovoltaické elektrárny - Digitální dvojče lze použít k modelování a simulaci výkonu sběrem dat ze senzorů a dalších zdrojů, jako jsou údaje o počasí a měření výkonu. Digitální dvojče lze poté použít k optimalizaci provozu FV elektrárny analýzou dat a vytvářením doporučení pro náklon panelů a plánů čištění. Digitální dvojče fotovoltaické elektrárny lze také použít k detekci a predikci potenciálních poruch, jako je degradace modulů nebo problémy se střídači, což umožňuje proaktivní údržbu a opravy. Dvojče je navíc možné použít pro virtuální zprovoznění a testování, čímž se sníží potřeba fyzických návštěv na místě a zlepší se efektivita procesu uvádění do provozu. Použití digitálního dvojčete za pomoci monitoringu a řízení pomáhá

společnostem zvýšit účinnost, spolehlivost a udržitelnost jejich fotovoltaických elektráren při výrobě energie. Aplikace této technologie se ovšem vyplatí teprve u velkých farem, kromě finanční zátěže ze zavedení a nákupu softwaru je potřeba vzít v úvahu úložiště a samotná zařízení, která budou data zpracovávat [17].

Ropné plošiny - Každá odstávka na ropné plošině znamená vysoké ztráty pro provozovatele, protože ropa je cennou surovinou a obsluha i dělníci nemají běžnou pracovní dobu, ale střídají se po několika týdenních turnusech. Tyto skutečnosti opodstatňují investice do zavedení digitálního dvojčete ropných plošin. Tam kde to technologie dovoluje jsou části rotačního ústrojí osazeny senzory. Zjištěná data umožňují optimalizaci a diagnostiku opotřebení vrtacího systému. Simulace vrtání také napomáhá odhalovat potenciální selhání technologického vybavení či nebezpečí, která vyplývají z geologické struktury mořského dna [18][19]. Další své využití dvojčata na ropných plošinách nacházejí v navijácích, které vrtací nástroj spouštějí do moře [20]. Na jejich bezporuchovosti je závislá celá vrtná souprava.

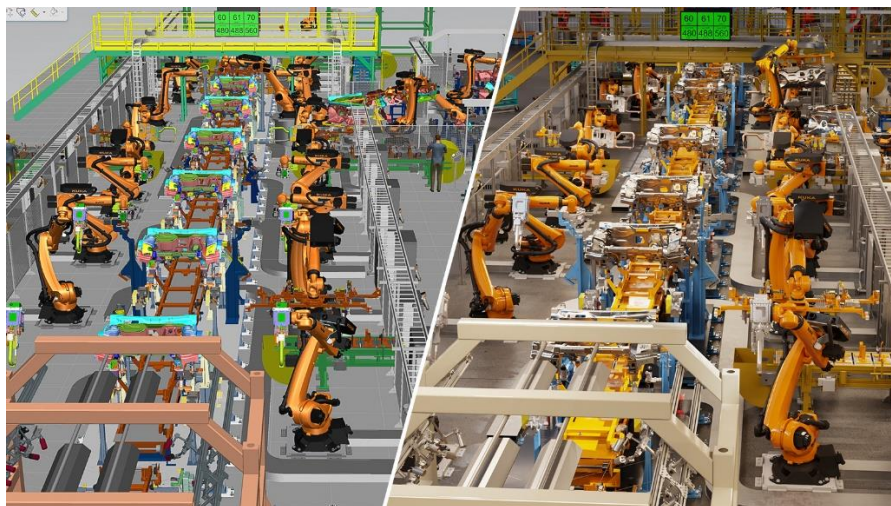


Obrázek 1.3 Digitální dvojče ropné plošiny [21]

Využití digitálních dvojčat ve výrobě - Ve srovnání s předchozími příklady je zde virtuální prostor komplexnější. Zahrnuje nejen 3D model fyzické linky a vyráběného produktu, ale také přesuny zaměstnanců, zásob ve skladech a pokud je to zapotřebí, i model výrobních prostor. Digitální dvojče také musí obsahovat parametry a fyzikální vlastnosti produktů v reálném světě. Až v okamžiku úspěšné integrace všech těchto aspektů může být virtuální reprezentace považována za dokončenou [22]. Pak je možné hovořit o tzv. chytré továrně (smart factory).

Digitální dvojče lze použít k modelování celého výrobního procesu, od vstupních surovin, až po hotové produkty připravené k expedici. V ideálním případě je digitální dvojče vytvořeno ještě před sestavením výrobní linky. Výrobci tak mohou identifikovat a zabránit potenciálním problémům dříve, než nastanou, to znamená provést potřebné úpravy výrobků, strojů, uspořádání linky a výrobních procesů ještě před tím, než dojde ke škodám. Jakmile je vše virtuálně odsimulováno a linka je postavena, práce s digitálním dvojčetem zdaleka nekončí, nastává proces neustálého zdokonalování.

Oceňovanými vlastnostmi dvojčete jsou aktualizace v reálném čase a schopnost analýzy na základě dat shromážděných z výrobního procesu, včetně dat inventurních, vypovídajících o množství zbývajících položek na skladě a ve výrobní hale. Získané informace jsou uplatněny v materiálových tocích, naskladňování, plnění zakázek a prediktivní údržbě. U obráběcích a dalších zařízení je možné odhalit nedostatky v okamžiku jejich návrhu a přijmout nápravná opatření dříve, než vzniklé problémy povedou k odstávce, což napomáhá zachování plynulosti provozu a prodloužení životnosti strojů. Digitální dvojčata lze také využít k testování a ověřování efektivity nových výrobních procesů nebo vhodnosti zařízení ještě před jejich implementací do výrobní linky. Analýza dat digitálním dvojčetem přispívá ke sledování spotřeby energií v procesu výroby a odhalení míst, kde je možné ušetřit finanční prostředky. Využitím pokročilé analytiky a strojového učení mohou společnosti přijímat rozhodnutí založená na získaných datech a konat informovanější rozhodnutí v záležitostech, jako jsou změny používaných materiálů a výrobních postupů. Zvýšit rychlost strojů a vyhodnotit, jak současně zachovat stejnou úroveň bezpečnosti je rovněž jedním z úkolů, který lze řešit pomocí simulace účinků změny parametrů výrobního procesu digitálním dvojčetem [23].



Obrázek 1.4 Digitální dvojče výrobní linky [24]

V oblasti elektrotechnické výroby se také vyskytuje výraz *digitální vlákno*. Tento pojem zahrnuje všechny fáze v životním cyklu produktu od návrhu až po jeho likvidaci. Nejdříve jsou vláknu přiřazovány údaje o dodavateli, o tom, jaké komponenty, či materiál dodává. Následuje detailní zaznamenávání a ukládání dat z výroby. Jsou to konkrétní informace týkající se úprav, které byly na výrobku provedeny, jaké procesy byly zvoleny, jaká zařízení byla využita, čísla šarží, zjištění vadných dílů nebo upozornění na potenciální problémy, ke kterým mohlo dojít. Pro tuto část vlákna lze přidávat libovolné informace dle požadavku zákazníka. V případě potřeby lze také přidat informace o stanovištích, která výrobky kompletovala a jejich vedoucích pracovnících. Uložená data jsou nápomocná týmu údržby a při servisování zařízení v poruchovém stavu. Do vlákna jsou začleněny i manuály a seznamy součástek, které umožní rychlé zjištění dostupnosti dílů u dodavatele. Digitální vlákno mimo jiné slouží pro budoucí potřeby, jako jsou návrhy produktů a zvyšování kvality nebo analýzy historických dat. Obsahují také doporučení, jak se zařízením nakládat v rámci ekologické likvidace při ukončení životního cyklu výrobku [22].

V literatuře se lze setkat s popisem použití dvojčat k navrhování prototypů. Jedná se o vytvoření digitálního prototypu, kdy je testování prováděno ve virtuálním prostředí, čímž jsou ušetřeny náklady na fyzické prototypy. Výsledkem je urychlení jejich vývoje, vyšší kvalita výrobku a zkrácení doby uvedení na trh. Validace musí být následně provedena pomocí fyzického systému, metoda však plní svůj účel, jelikož napomáhá ke snížení výskytu nákladných chyb a tedy i redukci finálního počtu

vyrobených prototypů [23]. S prototypováním úzce souvisí i what-if analýzy, které se však neomezují pouze na prototypy, ale je možné je využít i v ostatních výše uvedených průmyslových využitích digitálních dvojčat. Jde o analýzy různých scénářů „co kdyby“ nastaly nějaké nepříznivé okolní podmínky anebo jak by se změnila vlastnosti produktu při použití různých materiálů v průběhu prototypování. Analýzy umožňují předvídat, jak bude daný systém na nové vlivy reagovat, případně jaký dopad by změny materiálu mohly mít na následující fázi v životním cyklu produktu [22].

2. PŘÍPRAVA TVORBY DIGITÁLNÍHO DVOJČETE AKUMULÁTORU

V dnešní době již existuje mnoho softwarů pro tvorbu digitálních dvojčat. Patří sem známé společnosti jako Siemens s programem Tecnomatix, Predix firmy General Electric, Autodesk Tandem nebo MATLAB/Simulink [25]. Tato práce se soustředí a detailně popisuje software Twin Builder společnosti Ansys. Jako příklad využití Twin Builderu v bateriových systémech Li-Ion lze uvést finskou firmu Wärtsilä, která jej využila k sestavení modelu dynamického systému, včetně modelování chlazení, vytápění a řízení hmotnostního průtoku u svých akumulátorů [26]. Dalším příkladem z mnoha je společnost Skydweller, která použila Twin Builder při designování baterie pro dron poháněný fotovoltaickými články [27]. Mezi cloudové platformy pak patří Amazon Web Services, Microsoft Azure a Google Cloud Platform [10].

2.1 Ansys Twin Builder

Ansys Twin Builder je multitechnologická platforma, která umožňuje vytvářet digitální dvojčata založená na simulaci - digitální reprezentace systémů se vstupem z reálných senzorů. Twin Builder zlepšuje výsledky prediktivní údržby a optimalizuje provoz výrobku nebo zařízení. Pro rychlé a snadné vytvoření systému kombinuje Twin Builder výkon multidimenzionálního systémového modelování s rozsáhlými knihovny za pomoci modelu redukovaného řádu (ROM). V raných fázích projektu se digitální dvojčata primárně používají pro účely modelování, odhadování a tvorby prototypů. Co se týče testování nebo práce s daty v reálném čase, Twin Builder se dá snadno spárovat s ostatními Ansys softwary, platformami průmyslového internetu věcí (IIoT) či MATLABem a také obsahuje možnosti monitoringu za běhu, což umožní provádět prediktivní údržbu fyzického protějšku [28].

2.2 Měření HPPC dat

Lithium-iontové baterie jsou vysoce složité, multidimenzionální systémy pro ukládání energie, které jsou ovlivněny multiscale faktory - vlastnostmi na různých úrovních, od atomárních až po mikroskopické. Fungují na principu pohybu lithiových iontů a elektronů. Nabíjení a vybíjení baterie je výsledkem elektrochemické redoxní reakce

lithiových iontů. Proto je pochopení kinetiky materiálu elektrody klíčové pro plné porozumění této technologii a pro zlepšení výkonu. Tabulka 2.1 představuje všeobecně používané metody měření a řadí je do dvou skupin, na dynamické a statické.

Tabulka 2.1 Metody měření Li-Ion akumulátorů

Dynamické metody	
Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)	Rozkmitání systému v ustáleném stavu pomocí sinusového signálu v širokém rozsahu frekvencí a sledování odezvy za účelem stanovení hodnot součástek náhradního elektrického obvodu [29]
Hybridní pulzní charakterizace výkonu (HPPC)	Vybíjení a nabíjení je prováděno pomocí krátkých pulzů stanovenou hodnotou proudu a periodě odpočinku mezi měřeními
Cyklická voltametrie (CV)	Používaná k prozkoumání kinetiky redoxních reakcí pomocí cyklování akumulátoru [30]
Analýza derivace napětí (DVA)	Diagnostika degradačních mechanismů, zaměřuje se na změnu napětí vzhledem ke změně stavu nabití baterie
Statické metody	
Galvanostatická přerušovaná titrační technika (GITT)	Měří dočasné změny napětí na proudové pulzy. Po pulzu vždy následuje relaxace. Pro získání dat se měření cyklicky opakuje při různých stavech nabití [30]
Analýza přírůstků kapacity (ICA)	Identifikace změny v chemii baterie a stárnutí baterie analýzou derivace kapacity vzhledem k napětí

Vysvětlení pojmů a zkratk opětovně se vyskytujících v této práci:

SoC (State of Charge) - stav nabití, udává relativní uložené množství náboje k celkové kapacitě baterie v procentech. Může být vyjádřen následujícím vzorcem:

$$SoC = \frac{Q}{Q_n} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Kde Q je uložený náboj v baterii a Q_n její nominální kapacita

C (nebo také C-rate) - je označení proudového zatížení baterie v poměru k její celkové kapacitě. Základní zátěží je 1C, při které bude baterie vybita za jednu hodinu. Pokud by tedy byla jmenovitá kapacita baterie 2600 mAh, proud 1C je roven 2,6 A. Například při 0,5C by proud byl proud poloviční, tedy 1,3 A.

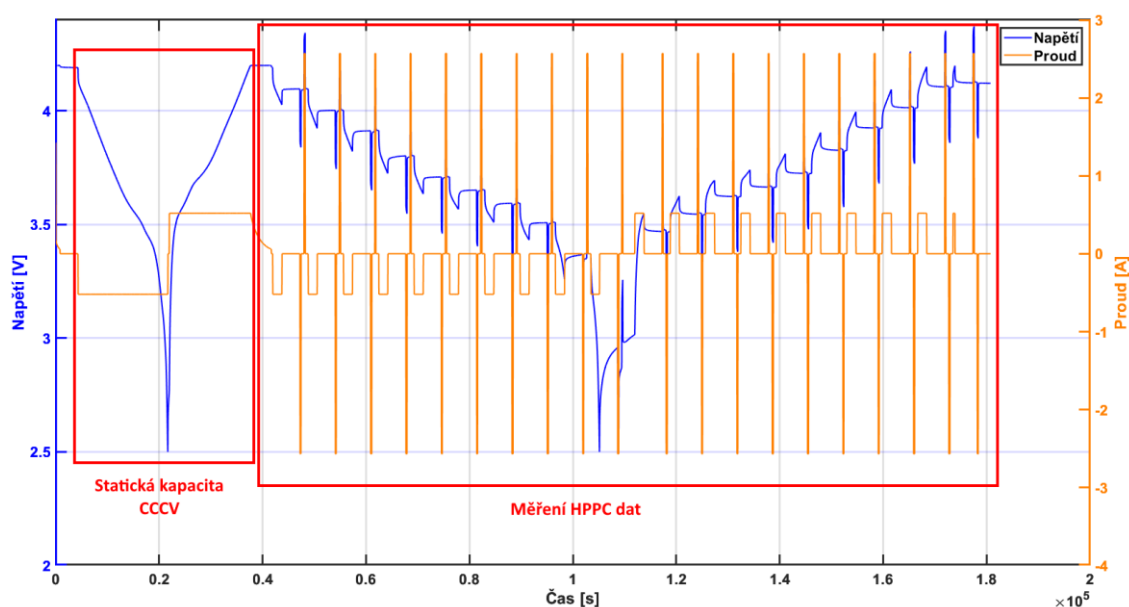
CCCV (Constant Current Constant Voltage) - specifická metoda vybíjení/nabíjení konstantním proudem a konstantním napětím. Baterie se zpočátku vybíjí konstantním proudem, dokud nedosáhne cut-off neboli minimálního napětí a poté nastane změna na vybíjení za konstantního napětí, proud postupně klesá, až do minimální hodnoty.

Před započítáním vytváření náhradního elektrického obvodu baterie je zapotřebí naměřit data, která popisují chování baterie. V případě této práce je použita metoda HPPC, která pokrývá dynamický rozsah provozních podmínek měřeného akumulátoru. Zachycení dynamického chování je klíčové k přesné identifikaci pro vytvoření robustních modelů baterie v dalším kroku. Hybridní pulzní charakterizace výkonu je metodika měření profilu, která zahrnuje vybíjecí i regenerační impulzy probíhající při vybraných stavech nabití (SoC) a lze je provádět při různých teplotních stresorech a proudových zatíženích. Vybíjecím impulzem je myšleno relativně krátké zatížení baterie a regeneračním impulzem je relativně krátké nabití. Tento profil lze přirovnat například k vybíjení a nabíjení, ke kterému dochází u elektromobilů při akceleraci a regeneračním brzdění.

Celkový měřený profil se skládá ze dvou hlavních částí, tou první je měření statické kapacity a druhou měření HPPC. Statický test kapacity začíná tím, že se baterie nabije z neznámé hodnoty SoC na plnou kapacitu a dále je vybíjena podle pokynů výrobce. Výrobce proud udává jako násobek vybíjecího proudu 1C. V této práci jsou měření prováděna na Li-Ion akumulátoru 18650 MG1, jsou tedy uvažovány následující

hodnoty: pokud má baterie jmenovitou kapacitu 2600 mAh a k vybíjení baterie výrobce udává 0,2C, výsledný proud vychází 520 mA.

Jakmile je známý zatěžovací proud, lze přistoupit k měření statické kapacity za použití metody CCCV. Baterie se vybíjí konstantním proudem, dokud nedosáhne minimálního napětí 2,5 V a poté se zařízení přepne na vybíjení za konstantního napětí. Až baterie dosáhne 0 % SoC, ponechá se po dostatečnou dobu v klidu, aby klesla teplota a akumulátor se dostal do rovnovážného stavu. Následuje nabíjení obdobným způsobem CCCV, až do plné kapacity. Tato hodnota bude uvažována jako 100 % SoC. Navazuje další klidová perioda [31]. Po vynesení závislosti napětí na čase do grafu tvoří statická kapacita křivku ve tvaru písmene V, viz obrázek 2.1.



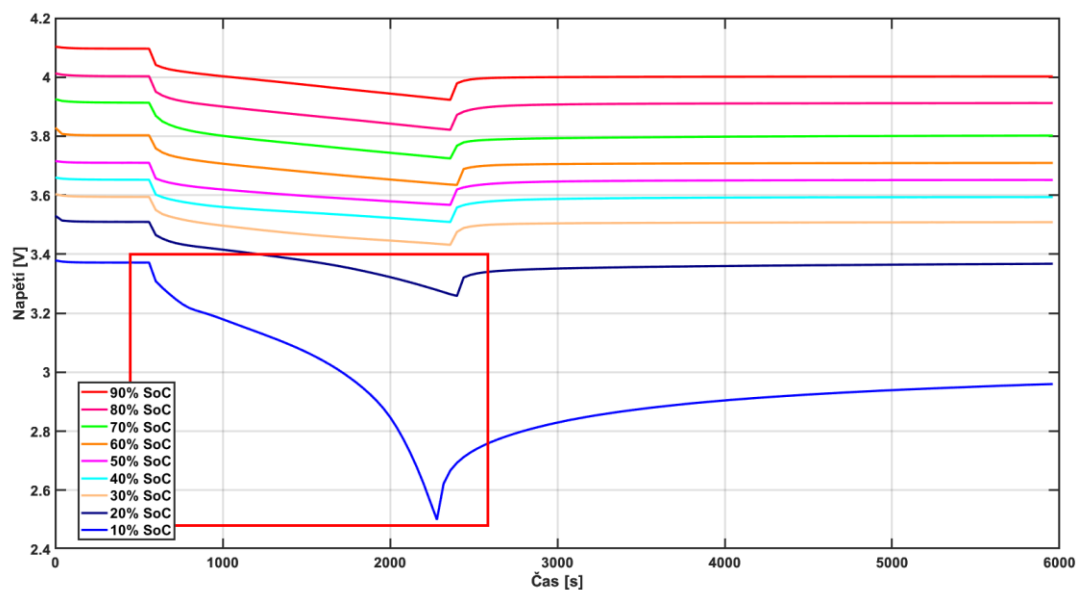
Obrázek 2.1 Naměřené hodnoty statické kapacity a HPPC dat

Druhou částí je měření hybridní pulzní charakterizace výkonu. Měření je následující: postupuje se jednotlivě po 10 % SoC z předchozího kroku. Dle dostupné literatury se měření provádí od 100 % do 0 % SoC, avšak hodnoty z křivky odpovídající kapacitám při 0; 10; 20 a 100 % SoC mohou být později problematické při určení parametrů součástek v náhradním obvodu baterie. Například při 10 a 20 % SoC je zjevný prudký pokles napětí v porovnání s předchozími křivkami, jak je označeno červeným ohraničením na obrázku 2.2.

Každý krok při měření se skládá z:

1. Odpočinku po dobu 60 minut
2. Vybíjecího impulsu: 1C po dobu 10 sekund
3. Odpočinku po dobu 10 minut (relaxace)
4. Regeneračního impulsu: 1C po dobu 10 sekund
5. Odpočinku po dobu 10 minut (relaxace)
6. Vybití o 10 % SoC proudem 0,2C, po kterém se pokračuje znovu od bodu jedna

Jakmile je baterie plně vybitá, obdobný process je použit i pro nabíjení [31].



Obrázek 2.2 SoC pro 10 až 90 %

Výsledné hodnoty se ukládají do Excel dokumentu, odtud je zapotřebí je extrahovat do poznámkového bloku typu .txt. Uspořádání dat musí následovat určitou strukturu: na prvním řádku je teplota (udávaná v Kelvinech), na druhém řádku SoC a ve zbytku souboru jsou řazeny postupně čas a napětí do dvou sloupců. Pro první dvě veličiny je stanoveno, jaký popisek k nim musí být přiřazen a je nutné aby byly napsány velkým písmem. Sloupce pro čas a napětí jsou uváděny bez popisku. Jako příklad je pod tímto odstavcem uveden obrázek 2.3 pro lepší představu o uspořádání naměřených dat.

```

File Edit Format View Help
TEMPERATURE 273.15
SOC 0.6
0.0 3.7410
10.0 3.7410
20.0 3.7410
30.0 3.7410
40.0 3.7410
40.2 3.6740
40.3 3.6690
40.4 3.6655
40.5 3.6533
40.6 3.6513
40.7 3.6511
40.8 3.6507

```

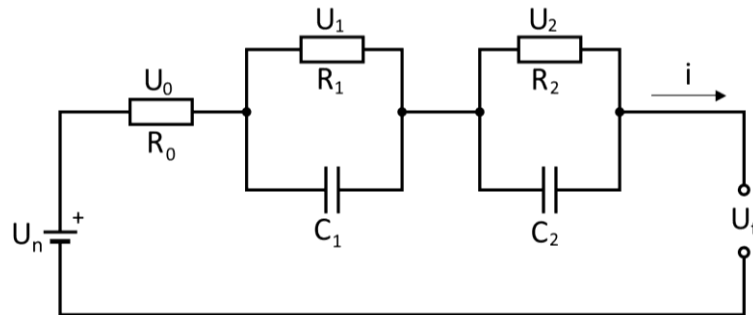
Obrázek 2.3 Poznámkový blok s příkladovými daty pro SoC 60 %

Měření se provádí za pomoci zařízení, které dokáže vytvářet impulzy a zároveň měřit odezvu baterie. Toto zařízení je připojeno k počítači, odkud jsou pulzy a čas ovládný příslušným softwarem. Především odstavec pojednával o bateriích měřených při jedné teplotě (pokojové teplotě) a jedné úrovni proudu. Počet poznámkových bloků s daty by byl tedy roven počtu SoC, ze kterých se bude náhradní obvod vytvářet. Další možností nabízenou Twin Builderem je použití více setů dat vždy měřených pro odlišné teploty. Pro takovéto případy se používají klimatické komory, které udržují baterie při požadované teplotě. V takové chvíli počet souborů s daty roste a zároveň roste i počet dat, která bude zapotřebí zpracovat. Nejpokročilejší možností je kombinace předchozího způsobu s opakováním pro různé hodnoty proudu, tedy pro různá C. Jak přesně musí být data seřazena ve výsledném poznámkovém bloku je znovu předem dáno a záleží na tom, za jakých podmínek byla baterie sledována. Jakmile jsou s daty provedeny potřebné úpravy, lze postoupit k jejich použití ve Twin Builderu.

2.3 Náhradní elektrický obvod baterie

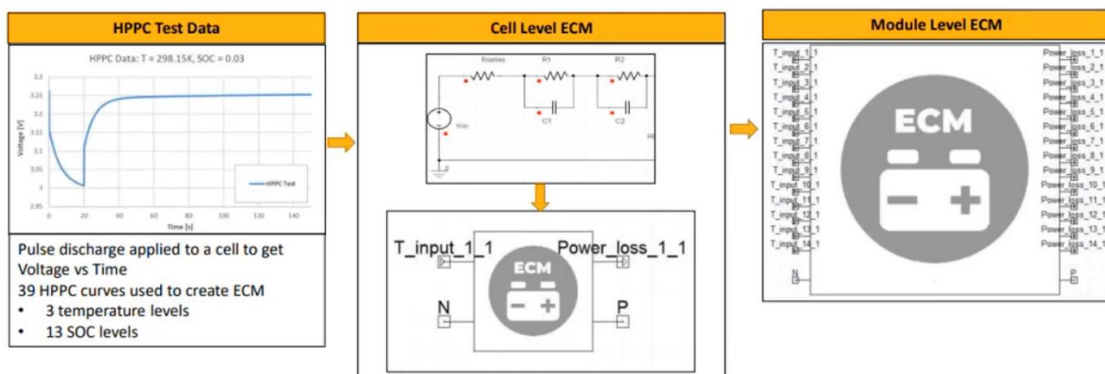
Taktéž nazývaný ECM (Equivalent Circuit Model), lze vidět na obrázku 2.4. Jde o zjednodušenou reprezentaci Li-Ion akumulátoru, využívanou pro pochopení jeho komplexního chování. Takovéto znalosti jsou zásadní při zkoumání zátěžových profilů, vzniku tepla, bezpečnosti a optimalizaci výkonu. U_n představuje napětí naprázdno, R_0 vnitřní odpor, i elektrický proud a U_t napětí na kontaktech akumulátoru. Nejjednodušší ECM sestává z jedné větve s odporem a kondenzátorem zapojenými paralelně. Pro potřeby této práce je nejvhodnější variantou zapojení se dvěma RC

větvemi [32]. V takovémto případě první RC větev představuje pomalé a druhá rychlé jevy v baterii. Odborníci obvykle používají obvody s jednou až pěti RC větvemi [33].



Obrázek 2.4 Náhradní elektrický obvod baterie [34]

V praktické části bude následovat extrakce hodnot z HPPC měření pro sestavení ECM pomocí Twin Builderu. Z ECM bude vytvořen blok, představující jeden akumulátor, se vstupy (výkon, případně i teplota) a výstupy (úbytek napětí). Akumulátory jsou poté skládány do jednotlivých bloků, které zachovávají jejich vstupy a výstupy, jak je znázorněno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 Bloky představující ECM v softwaru Ansys Twin Builder [35]

Náhradní elektrický obvod je ve Twin Builderu tvořen pomocí metody Jiang-Hu. Při určení hodnot součástek v ECM je postup následující: Nejprve je stanoveno napětí baterie naprázdno a vnitřní odpor. Poté se pokračuje zbývajících parametry R_1 , C_1 a R_2 , C_2 . Jejich výpočet zahrnuje stanovení časových konstant a k tomu je využita regresní rovnice [34].

Rovnice vychází z obrázku 2.4, kde U , R , C jsou indexovány podle sériového rezistoru, či paralelních větví. Lze tedy říci, že platí vztahy níže, díky kterým budou rovnice dále upraveny:

$$U_t = U_n - U_0 - U_1 - U_2 \quad (2.2)$$

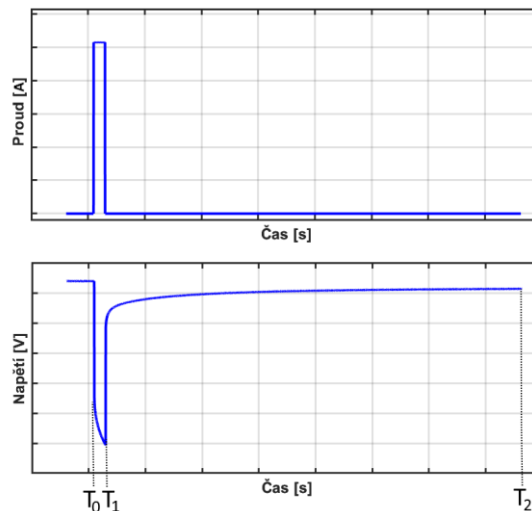
$$U_0 = iR_0 \quad (2.3)$$

$$C_1 \frac{dU_1}{dt} + \frac{U_1}{R_1} = i \quad (2.4)$$

$$C_2 \frac{dU_2}{dt} + \frac{U_2}{R_2} = i \quad (2.5)$$

Kde U_t je napětí na kontaktech baterie (V)
 U_n je napětí naprázdno (V)
 t je čas (s)
 i je proud (A)

Následující graf znázorňuje označení časů T v jednotlivých částech vybíjecího impulsu.



Obrázek 2.6 Průběh vybíjecího impulsu převzato z [34] a upraveno

Nejprve napětí naprázdno U_n a vnitřní odpor R_0 . Za předpokladu, že baterie měla dostatek času na zotavení od poslední zátěže, pro napětí naprázdno se vychází z času T_0^- . Mínus v horním indexu značí, že jde o čas těsně před T_0 , vztah je následující:

$$U_n = U_t(T_0^-) \quad (2.6)$$

Kde T_0^- je čas bezprostředně před začátkem impulsu (s)

Jelikož vnitřní odpor způsobí okamžitý pokles napětí na baterii při skokové změně proudu o velikosti I , je možné jej vypočítat podle vzorce:

$$R_0 = \frac{U_t(T_0^-) - U_t(T_0^+)}{I} \quad (2.7)$$

Kde T_0^+ je čas bezprostředně po začátku impulsu (s)

Druhým požadavkem je dostat se k časovým konstantám τ_1 a τ_2 . Protože doba trvání impulsu je poměrně krátká, nemusí naměřená data během impulsu obsahovat dostatečné informace pro získání správných časových konstant. Naopak doba relaxace může trvat minuty až hodiny, a proto o charakteru časových konstant nejlépe vypovídá chování napětí baterie během relaxace. Na základě tohoto pozorování se pro identifikaci použijí naměřená data od času T_1^+ do T_2 [34]. Napětí na první a druhé paralelní větvi v počátečním stavu se označí U_{10} a U_{20} , platí pro ně vztahy:

$$U_{10} = U_1(T_1) \quad (2.8)$$

$$U_{20} = U_2(T_1) \quad (2.9)$$

Po dosazení rovnic (2.4) a (2.5) vzorce vypadají následovně:

$$U_1(t - T_1) = U_{10} e^{\frac{t-T_1}{\tau_1}} \quad (2.10)$$

$$U_2(t - T_1) = U_{20} e^{\frac{t-T_1}{\tau_2}} \quad (2.11)$$

Kde τ_1 a τ_2 jsou časové konstanty (s)

A poté z rovnic (2.2) a (2.3) vyplývá že:

$$U_t(t - T_1) = U_n - U_1(t - T_1) - U_2(t - T_1) \quad (2.12)$$

Dále je definována proměnná V jako:

$$V = U_1 + U_2 \quad (2.13)$$

Odsud je získána rovnice v tomto tvaru:

$$V(t - T_1) = U_{10} e^{\frac{t-T_1}{\tau_1}} + U_{20} e^{\frac{t-T_1}{\tau_2}} \quad (2.14)$$

Zároveň je vztah z rovnice (2.12) upraven jako:

$$V(t - T_1) = U_n - U_t(t - T_1) \quad (2.15)$$

Zde jsou známy hodnoty pro pravou stranu rovnice, $V(t - T_1)$ výpočet se provádí vytvořením rovnice regrese s proměnnými X , Y , kterou lze upravit do tvaru:

$$Y(t - T_1) = -X(t - T_1)(\tau_1 + \tau_2) - V(t - T_1)\tau_1\tau_2 + (U_{10}\tau_1 + U_{20}\tau_2)(t - T_1) + (U_{10} + U_{20})\tau_1\tau_2 \quad (2.16)$$

Rovnici regrese je výhodné napsat maticově, tedy:

$$Y(t - T_1) = [-X(t - T_1) \quad -V(t - T_1) \quad t - T_1 \quad 1] \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1\tau_2 \\ U_{10}\tau_1 + U_{20}\tau_2 \\ (U_{10} + U_{20})\tau_1\tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Poté je matice rozšířena o všechny naměřené hodnoty v časech od T_1 do T_2 :

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_1 & -V_1 & -t_1 - T_1 & 1 \\ -X_2 & -V_2 & -t_2 - T_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_n & -V_n & -t_n - T_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1\tau_2 \\ U_{10}\tau_1 + U_{20}\tau_2 \\ (U_{10} + U_{20})\tau_1\tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Vektor a dvě matice jsou označeny jako B , A , P a jsou zapsány maticovou rovnicí:

$$B = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -X_1 & -V_1 & -t_1 - T_1 & 1 \\ -X_2 & -V_2 & -t_2 - T_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_n & -V_n & -t_n - T_1 & 1 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1\tau_2 \\ U_{10}\tau_1 + U_{20}\tau_2 \\ (U_{10} + U_{20})\tau_1\tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$B = AP \quad (2.20)$$

V této chvíli je použita metoda nejmenších čtverců a hodnoty τ_1 a τ_2 stejně jako U_{10} a U_{20} jsou vypočteny z maticové rovnice:

$$P = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.21)$$

R_1 a R_2 vycházejí ze vzorců:

$$U_{10} = IR_1 \left(1 - e^{\frac{T_1}{\tau_1}} \right) \quad (2.22)$$

$$U_{20} = IR_2 \left(1 - e^{\frac{T_1}{\tau_2}} \right) \quad (2.23)$$

A nakonec se kapacity vypočítají dosazením do:

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (2.24)$$

$$\tau_2 = R_2 C_2 \quad (2.25)$$

Toto byla první část metody, kterou představil Shugang Jiang. Do formy v jaké ji dnes používá Twin Builder byla upravena zaměstnancem Ansysu Xiao Hu, jenž se zaměřil na tři hlavní nedostatky, ke kterým může dojít. První modifikací je provedení singulárního rozkladu, před použitím metody nejmenších čtverců. Tato modifikace řeší případy, ve kterých by hodnota matice nebyla dostačující. Modifikace je preventivně používána vždy, jelikož výsledky se při dostačující hodnotě matice nemění [36]. Druhou úpravou je změna matice do tvaru:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_1 & V_0 - V_1 & t_1 \\ -X_2 & V_0 - V_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_m & V_0 - V_m & t_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1 \tau_2 \\ U_{10} \tau_1 + U_{20} \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Což vychází z $U_{10} + U_{20} = V_0$. Úprava řeší problémy které mohly vzniknout v důsledku toho, že Jiangova metoda zaručuje dostačující aproximaci pouze pro funkci Y , nicméně, funkce pro X nemusí být vždy odpovídající a řešení by nevyšlo správně. Nakonec, při použití více, než čtyř řádků dat vzniká nelineární systém, který se počítá pomocí Levenberg-Marquardtova algoritmu. Tato modifikovaná metoda je nyní nazývána podle obou odborníků, tedy Jiang-Hu [36].

2.4 Redukované modely a LTI ROM

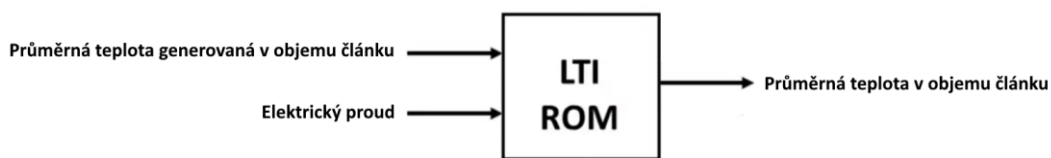
Vědci již dlouho hledali efektivní metodu, která by snižovala složitost systému a zároveň zachovala jeho vlastnosti. V současnosti jsou tato řešení označována jako modely redukovaného řádu (ROM). Podstatou redukovaných modelů je zachytit hlavní fyzikální charakteristiky systému pomocí relativně jednoduchého matematického modelu a z něj vytvořit black box, který na zadaný vstup reaguje výstupem, jenž je v ideálním případě totožný se systémem původním. Přesnost výsledků je však určena složitostí modelu a od toho se odvíjí náročnost procesu jeho tvorby [37].

LTI ROM je zkratkou pro lineární, v čase neměnný model redukovaného řádu. Pro upřesnění pojmu LTI ROM je nejprve zapotřebí objasnit, co je to výpočetní dynamika tekutin (CFD simulace). Jde o simulace používající výpočty Navier-Stokesových rovnic pro popis teploty, rychlosti, hustoty a tlaku pohybujících se tekutin. Takovéto analýzy jsou pro zkoumání baterií zásadní. Digitální dvojče však upřednostňuje rychlejší zpracování dat, než je tomu u CFD simulací. Z toho důvodu se přešlo k použití redukovaných modelů. U digitálních dvojčat redukované modely zastupují CFD simulace při stanovení rozložení tepla a zahřívání akumulátoru, protože jejich výpočty jsou rychlejší a mají menší požadavky na výpočetní výkon při zachování dostatečné přesnosti. Redukované modely jsou vytvářeny pomocí aproximace (fitování) vektorů a po jejich vygenerování se na LTI ROM nahlíží jako na MIMO systém, tedy popis stavů systému s vícenásobnými vstupy a výstupy. Proces fitování probíhá ve frekvenční doméně a funkce modelu stavového prostoru je zjištěna pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) impulzní odezvy z modelu CFD [38]. Proces lze seřadit do následujících kroků:

1. Získání krokové odezvy z CFD simulace
2. Výpočet impulzní odezvy, ten je proveden jako derivace krokové odezvy podle času
3. Vzorkování křivky impulzní odezvy (je třeba splnit vzorkovací teorém, aby se zabránilo aliasingu, v některých případech může být potřeba použít zero padding, tedy přidání nul na konec signálu, což zajistí delší výsledný vektor)
4. Provedení rychlé Furierovy transformace vzorkované impulzní odezvy
5. Zvolení vhodného měřítka pro nízkofrekvenční část FFT
6. Vektorové fitování pro získání pólů a reziduí přenosové funkce modelu stavového prostoru
7. Sestavení modelu stavového prostoru z přenosové funkce
8. Řešení pro model stavového prostoru v simulátoru [38]

LTI ROM bude řešen pomocí Twin Builderu a pro vytvoření trénovacích dat bude použit Fluent, což je další software z nabídky společnosti Ansys. Fluent bude zároveň využit i ke zpětnému ověření správnosti výstupních dat z LTI ROMu.

Prvním krokem je vytvoření modelu akumulátoru 18650. Vstupy se definují jako generovaná teplota a elektrický proud, výstupem bude teplota baterie, viz obrázek 2.7. K získání dat je určena funkce Battery ROM Toolkit. Nastaví se hodnota generovaného tepla a proudu, ze kterých Fluent vytvoří trénovací data. Následně je vhodné přenést data do Excelu, vynést závislost teploty na čase do grafu a zkontrolovat, že bylo dosaženo rovnovážného stavu [39]. Poté je zapotřebí se vrátit zpět do prostředí Twin Builderu a spustit Thermal Model Identification. Nastaví se umístění dokumentu s trénovacími daty a nechá se vygenerovat LTI ROM. Jeho přesnost je možné ověřit za pomoci Fluentu například provedením studie pro spřažený přenos tepla CHT Coupling pro stejné vstupní hodnoty a porovnáním výsledků [40].



Obrázek 2.7 Vstupy a výstupy pro LTI ROM [39]

2.5 Přenos dat v reálném čase

Je známo, že digitální dvojčata vynikají schopností pracovat v reálném čase, nicméně v praxi je mnohdy vhodnější data ze senzorů na fyzickém systému průběžně ukládat a vytvářet z nich pakety. Ty jsou odesílány do digitálního dvojčete vždy za daný časový úsek. I přes to, že segmentace dat do paketů má za následek delší doby mezi odesláním souborů do dvojčete, zůstává vzorkovací frekvence senzorů monitorujících fyzický systém vysoká. Rychlosti senzorů lze dělit do tří skupin:

Vysoká frekvence vzorkování (milisekundy až sekundy), je vyžadována například u obráběcích CNC strojů [41] nebo právě u baterií, kde je nutné podrobně zaznamenávat vybíjecí pulzy a napěťové odezvy. Odesílání dat po paketách je zde nutností z důvodu latence a rozdílných vzorkovacích frekvencí použitých senzorů.

Střední frekvence vzorkování (minuty), využívaná ve výrobních procesech, kde nedochází k náhlým změnám, ale naopak k postupným změnám, například teploty.

Nízká frekvence vzorkování (hodiny), která nachází své uplatnění při monitoringu nosných konstrukcí budov, mostů a nebo jiných staveb.

Na monitorovaná data jsou kladeny následující požadavky. Je to především nízký šum a malá latence, dále je třeba se vyhnout shromažďování nadbytečných dat nebo je co nejvíce minimalizovat. Poté zajistit vhodné pojmenování souborů a jejich formát, aby je dvojče při zpracování dokázalo načíst a nemohlo dojít k záměně. Důležitým faktorem je kybernetická bezpečnost a je třeba, aby byla síť či jiný způsob propojení schopen poskytnout bezpečný a spolehlivý mechanismus výměny informací. Jednou z variant zabezpečení je například segmentace sítě. V neposlední řadě je potřeba dostatečná mezipaměť pro uložení dat, než z nich bude vytvořena paketa, aby bylo zajištěno efektivní doručování dat [42].

Dalším nezanedbatelným krokem je ukládání dat a jejich zálohování. Data odesílaná do digitálního dvojčete jsou souběžně ukládána na cloudová úložiště, aby se dvojče mohlo učit z historických dat. Dlouhodobý monitoring je pro tuto práci zásadní například z důvodu stárnutí baterie. Při zálohování je doporučeno plně využít technologii komprese dat pro snížení nákladů na úložiště. K dispozici jsou metody ztrátové a bezztrátové komprese v závislosti na typu dat, která budou ukládána.

Data je také možné dělit na:

- Stav hardwaru
- Údaje o okolním prostředí
- Konfigurační data, která jsou potřebná k transformaci systému z počátečního do aktuálního stavu
- Statistiky jako je ztráta paketů nebo latence
- Signalizaci provozního stavu fyzických senzorů
- Údaje o životním cyklu všech prvků v systému
- V některých případech údaje týkající se uživatelů [42]

V této práci jsou zaznamenávanými daty proud, teplota a napětí.

2.6 Hodnocení kvality modelu

V této práci se často objevují grafy porovnávající data simulovaná s daty naměřenými. V těchto případech je z pohledu hodnocení kvality vhodné provést kvantifikaci chyby

navrženého modelu. Pro definování chyb byla jako metrika zvolena odmocnina ze střední kvadratické chyby (Root Mean Square Error - RMSE), která je v odborné literatuře běžně používána pro kvantifikaci chyby modelů a slouží k hodnocení průměrné chyby modelu přímo ze známých dat. Lze ji určit následujícím vzorcem:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.27)$$

Kde n definuje počet naměřených hodnot, y_i jsou naměřené hodnoty a \hat{y}_i představuje hodnoty vypočtené při simulaci.

K určení směrodatné odchylky byl využíván kód v MATLABu.

3. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato kapitola představuje cíle diplomové práce, které jsou v následující kapitole řešeny. Cíle práce lze rozdělit do tří částí. První z nich se zaměřuje na elektrický model baterie, ve druhé jde především o model tepla a poslední část se věnuje vytvoření digitálního dvojčete kombinací obou modelů.

Elektrický model

- Vytvořit měřicí profil pro potenciostat, který zajistí naměření dat
- Analyzovat naměřená data a navrhnout vhodný kód v MATLABu, který extrahuje vybíjecí impulzy a jejich odezvy
- Nafitovat impulzy ve Twin Builderu a validovat je pomocí originálních dat naměřených potenciostatem

Model tepla

- Vymodelovat 3D geometrii Li-Ion akumulátoru
- Geometrii použít pro fyzikální model a provést verifikaci a validaci
- Na základě fyzikálního modelu ve Fluentu vytvořit trénovací data
- Z trénovacích dat vygenerovat LTI ROM a porovnat jej s hodnotami z fyzikálního modelu

Digitální dvojče

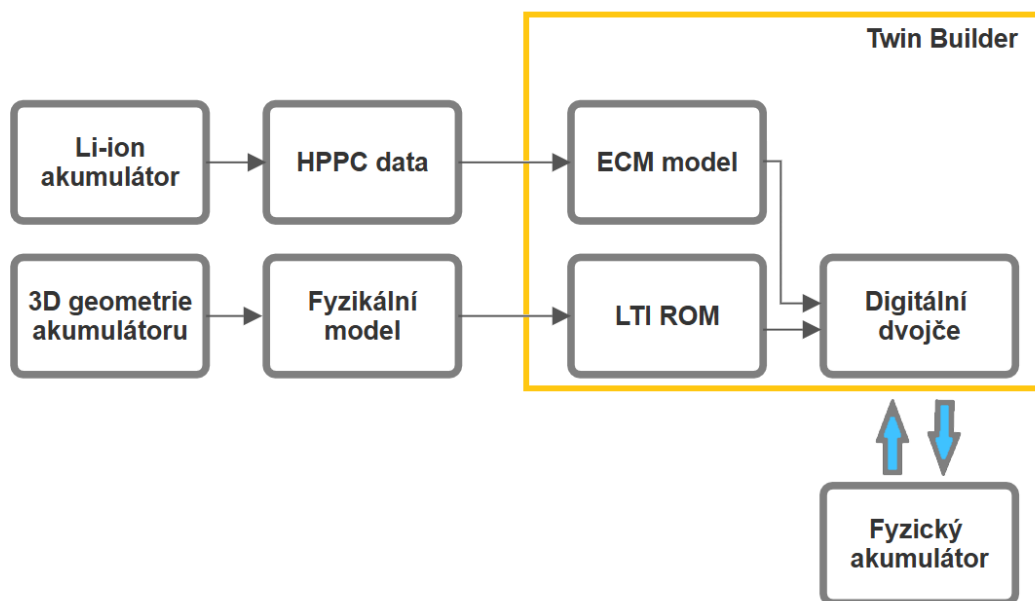
- Propojit elektrický model a model tepla v digitální dvojče
- Ověřit funkčnost digitálního dvojčete
- Porovnat simulované výsledky s naměřenými daty

4. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části se práce zabývá nejprve postupem tvorby digitálního dvojčete a správnou formou profilu pro potenciostat, kterým jsou následně měřeny tři části: nabití na plnou kapacitu, CCCV a HPPC test. Tato data je před dalším použitím nutné náležitě zpracovat a poté jsou nahrána do Twin Builderu, kde je z nich vytvořen náhradní obvod akumulátoru ECM. Dále je použit Fluent pro vytvoření trénovacích dat, ze kterých je vytvořen redukovaný model. Digitální dvojče je sestaveno propojením elektrického modelu a modelu tepla, poté je provedena verifikace a validace.

4.1 Postup tvorby digitálního dvojčete

Před započítím měření je nejprve nutné si ujasnit, jak celý postup tvorby digitálního dvojčete probíhá a že jeho základem jsou naměřená data a fyzikální model akumulátoru. Na obrázku 4.1 je znázorněn blokový diagram toho, jak na sebe jednotlivé kroky navazují, z čeho se digitální dvojče skládá a odkud jsou data pro jeho vytvoření získána.



Obrázek 4.1 Blokový diagram postupu tvorby digitálního dvojčete

První tři bloky diagramu: Li-Ion akumulátor, HPPC data a ECM model se zabývají popisem elektrického modelu.

Li-Ion akumulátor - Na začátku je lithium-iontový akumulátor, který je potřeba charakterizovat a přenést do virtuálního prostředí. V prvním kroku je připojen k potenciostatu a osazen termočlánkem. Podle měřicího profilu jsou na něm naměřena data při sérii vybíjecích a nabíjecích impulzů.

HPPC data - Zásadní částí měřicího profilu je HPPC test, kde se jedná o krátký vybíjecí a nabíjecí impulz a jejich odezvy. To je provedeno při jedenácti úrovních nabití v rozmezí od plně nabité baterie, až po zcela vybitou. Souhrn dat při všech jedenácti úrovních nabití se pak nazývá HPPC data.

ECM model - Po zpracování jsou HPPC data přenesena do Twin Builderu, který je schopen matematickými funkcemi naměřená data nafitovat na součástky v náhradním elektrickém obvodu. Zároveň chování elektrického obvodu popíše balck boxem, který se v uživatelském prostředí promítne jako blok ECM model.

Spodní tři bloky diagramu: 3D geometrie akumulátoru, fyzikální model a LTI ROM se zabývají popisem modelu tepla.

3D geometrie akumulátoru - Geometrie je vymodelována dle tvaru akumulátoru o příslušných rozměrech a na ní je vytvořena mesh. Používá se pro definování okrajových podmínek jako je kladný a záporný kontakt baterie.

Fyzikální model - Geometrie je přenesena do Fluentu a pomocí soustav rovnic založených na základě fyzikálních zákonů jsou popsány děje v akumulátoru. Tím vzniká fyzikální model akumulátoru. Po nastavení materiálových vlastností a okrajových podmínek mohou být vygenerována trénovací data.

LTI ROM - Výpočet analýzy ve Fluentu trvá příliš dlouho na to, aby jej bylo možné použít při komunikaci v reálném čase. Proto jsou trénovací data použita k vytvoření LTI ROMu. Protože je potřeba rychlejší výpočet, je úloha linearizována a jedná se o redukovaný model, odsud je odvozen název, který je zkratkou slov *Linear Time Invariant Reduced Order Model*.

Nakonec jsou zde dva poslední bloky, digitální dvojče a fyzický akumulátor. Žlutým obdélníkem jsou ohraničeny bloky, u kterých jsou úkony prováděny ve Twin Builderu.

Digitální dvojče - Je virtuální reprezentací fyzického akumulátoru, skládá se z výsledných dvou bloků pro model tepla a elektrický model z předchozích kroků. Fyzický protějšek je osazen termočlánky a jejich výstupy jsou spárovány s digitálním dvojčetem. Dále jsou do dvojčete přivedeny hodnoty napětí, proudu a teploty. Přenos dat ze senzorů probíhá v reálném čase a dvojče je schopné regulovat fyzický systém.

Fyzický akumulátor - Jedná se o jeden nebo sérioparalelní uspořádání většího počtu akumulátorů stejného typu jako byl měřený v prvním kroku. V praxi by mohlo jít například o baterii elektromobilu nebo v energetice o bateriové úložiště.

4.2 Měřicí profil

Jako první je nezbytné získat hodnoty, které charakterizují chování baterie při nabíjení a vybíjení. K tomu je použit potenciostat BioLogic BCS-815, který umožňuje řídit nabíjecí a vybíjecí proudy a zároveň měřit napětí a teplotu. Měřicí profily následují strukturu, jejíž podrobný popis byl obsažen v podkapitole 2.2 a vzájemně se od sebe liší v hodnotách proudu a teploty. První část profilu je vždy stejná, na potenciostatu je nastaveno vybíjení/nabíjení za konstantního proudu a poté konstantního napětí. Pro druhou část profilu je do potenciostatu nutné nahrát hodnoty proudových impulzů a v jakých časech k nim dochází. K tomu poslouží krátký textový soubor dodržující následující formát:

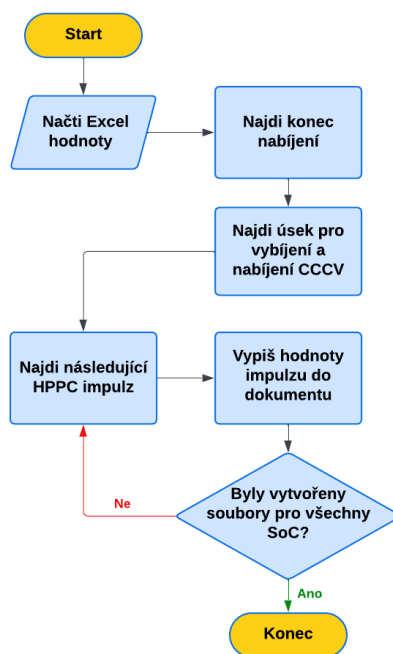
Time/s	Current/A
0	0.00
3600	-1.30
3610	0.00
4210	1.30
4220	0.00
4820	-0.52
6619	-0.52

Obrázek 4.2 Zadání proudů pro první polovinu HPPC dat

Krátký je proto, že je možné tuto část impulsů a odpočinku provést desetkrát za sebou, čímž se baterie dostane na 0 % SoC, jak je požadováno. Obdobně je to možné udělat pro část nabíjecích impulsů, až po nabití do 100 % SoC, avšak vybíjecí část je dostačující. Pro udržení stále požadované teploty je baterie vkládána do klimatické komory.

4.3 Zpracování dat

Jak bylo již dříve popsáno v teoretické části, Twin Builder přijímá soubory v podobě poznámkového bloku, HPPC data je před samotným fitováním nutné extrahovat z Excelu a poté upravit do podoby jak znázornil obrázek 2.3 ve druhé kapitole. K provedení těchto požadavků je použit MATLAB. Ve zjednodušené podobě kód funguje dle vývojového diagramu znázorněného níže na obrázku.



Obrázek 4.3 Vývojový diagram

Základní požadavky na program jsou tedy přenést data z Excelu do matice v MATLABu, projít je řádek po řádku a vyhledat, kde se nachází nulové a nenulové hodnoty proudu. Dále vytvořit poznámkový blok, do kterého bude uložena pouze vybíjecí část impulsu a jeho odezva při stupních nabití 100 % až 0 % SoC.

Nejvhodnějším způsobem je tedy postupovat od formátu zaznamenaných dat v Excelu. Výstupní soubor z měření obsahuje sloupce hodnot pro čas, napětí, proud, kapacitu a teplotu. V tuto chvíli přichází na řadu práce se sloupci pro čas, napětí a proud. Jelikož se měřený profil skládá z více částí (nabití na plnou kapacitu, CCCV test a HPPC s relaxačními odezvami) je zapotřebí vyhledat, kde se v souboru nachází kýžená HPPC část dat, a z ní vybrat příslušné vybíjecí impulzy a jejich odezvy, se kterými se bude dále pracovat. Před každým impulzem končí relaxační odezva z předchozího měření, následuje impulz a poté relaxace. Uspořádání hodnot v Excel souboru vypadá například pro impulz, kterým je baterie vybita při 90 % SoC, následovně:

	A	B	C	D	E	F	
	Čas [s]	Napětí [V]	Proud [mA]				
⋮	⋮	⋮	⋮				
177633	54087.4	4.0988	0				
177634	54088.4	4.0987	0				
177635	54089.4	4.0987	0			Relaxace po CCCV	
177636	54090.4	4.0987	0				
177637	54091.4	4.0988	0				
177638	54092.4	4.0988	0				
177639	54093.4	4.0988	0				
177640	54094.4	4.0987	0				
177641	54095.4	4.0223	-2568.7600				
177642	54095.4	4.0221	-2569.1541				
177643	54095.4	4.0209	-2568.7600				
177644	54095.4	4.0204	-2569.5476				
177645	54095.5	4.0199	-2569.1541				
177646	54095.5	4.0195	-2568.5632				
177647	54095.5	4.0191	-2567.1851				
177648	54095.5	4.0189	-2569.1541			HPPC impulz	
177649	54095.5	4.0184	-2569.5476				
177650	54095.6	4.0181	-2568.3665				
⋮	⋮	⋮	⋮				
177653	54105.3	3.9855	-2568.5632				
177654	54105.3	3.9856	-2568.5632				
177655	54105.4	3.9855	-2569.3511				
177656	54105.4	3.9855	-2569.3511				
177657	54105.4	3.9854	-2568.5632				
177658	54105.4	4.0634	0				
177659	54105.5	4.0652	0				
177660	54105.6	4.0665	0				
177661	54105.7	4.0675	0				
177662	54105.8	4.0683	0			Relaxace po impulzu	
177663	54105.9	4.0691	0				
177664	54106.0	4.0699	0				
⋮	⋮	⋮	⋮				

Obrázek 4.4 Příklad naměřených dat

I přesto, že vybíjecí impulz trvá pouze 10 sekund, do Excelu se díky frekvenci měření zaznamená přes 500 hodnot, proto zde impulz není vyobrazen celý. Relaxace pak trvá 10 minut, což se do Excelu promítne jako 6 tisíc řádků s hodnotou proudu 0 mA. Kompletní soubor obsahuje přes 300 tisíc řádků.

Vzhledem k uspořádání Excel souboru je nabíjení a vybíjení vždy odděleno odezvami o nulové hodnotě proudu. Ideálním řešením je toto vodičko do kódu zakomponovat, jelikož jde o relativně snadný způsob, jak jednotlivé části dat oddělit. Princip kódu je tedy založen na nacházení nul a nenulových hodnot ve sloupci proudu a na základě toho jsou vypisovány časy a napětí do poznámkového bloku.

Nejprve je nastavena cesta k Excel souboru a z něj jsou exportována data do matice v MATLABu. První sloupec matice je uložen pod proměnnou **T**, jako hodnoty času a třetí sloupec pod proměnnou **I** jako proud. Následně lze přistoupit k definici hledání hodnot. To je zajištěno dvěma funkcemi, jedna slouží k nalezení první nulové hodnoty proudu a druhá ke hledání první nenulové hodnoty. Funkce pro nalezení první nulové hodnoty je následující:

```

%*****
function pos = findFirstZero(I)      % Vstupem funkce je vektor I
    zeroIndices = find(I == 0);     % Funkce hledá nulu v I

    if isempty(zeroIndices)         % Pokud se nejedná o nulu
        pos = [];                  % Vrací prázdné pole

    else
        pos = zeroIndices(1);      % Jinak vrací řádek s první nulou
    end
end

```

Tato funkce na vstupu přijímá vektor **I**, u kterého se předpokládá, že obsahuje pouze numerické hodnoty. Využitím **find** je nalezen první řádek, jehož hodnota v **I** je nula a je uložen do proměnné **zeroIndices**. Funkce kontroluje, zda je pole **zeroIndices** prázdné. Pokud ano, znamená to, že ve vstupním vektoru nejsou žádné nuly. Pokud zaznamená nulu, jako výstup funkce vrátí číslo řádku ve kterém se první nula v souboru nachází. Funkce vyhledávající první nenulovou hodnotu je obdobná, s tím rozdílem, že ve druhém řádku je nerovnost, tedy **zeroIndices = find(I ~= 0)**.

V zájmu zjednodušení zdrojového kódu byla později provedena následující úprava. Obě funkce byly sloučeny do jedné a při hledání je pouze zjištěno, zda je nadcházející hodnota nulová či nikoliv. Následující zdrojový kód vyobrazuje upravenou funkci a demonstruje její použití v CCCV části měření:

```

%*****
% Definování funkce pro vyhledání první nuly
findFirst = @(x, val) find(x == val, 1);

% CCCV (Constant Current, Constant Voltage)
row = findFirst(I, 0);           % Fáze před CCCV, dobití na SoC = 100 %
for CCCV = 1:2
    row = row + findFirst(I(row:end) ~= 0, 1) - 1; % Konec relaxace
    row = row + findFirst(I(row:end) == 0, 1) - 1;
end

```

Na prvním řádku je vytvořena funkce **findFirst**, která najde řádek ve kterém dojde k prvnímu výskytu hledané hodnoty (**val**) v zadaném vektoru. Zda bude funkce vyhledávat nulovou či nenulovou hodnotu je definováno za pomoci `~= 0` nebo `== 0`, protože je zapotřebí se pohybovat ve třetím sloupci pro proud, jako **x** je vždy zvolen vektor **I**. Podobně jako předchozí kód, pokud funkce zaznamená hledanou hodnotu, tak jako výstup vrátí číslo řádku, ve kterém se hodnota nachází. Symbol `@` označuje, že se jedná o anonymní funkci, což je typ funkce, která je definována bez samostatného souboru funkce. Namísto toho může být definována přímo v řádku kódu tzv. inline.

Po definování funkce je jejím prostřednictvím nalezena první nulová hodnota, postupuje se tedy od začátku dokumentu, až na řádek, kde se nula nachází a ten je uložen do proměnné **row**. Následuje vstoupení do cyklu **for**, kde je funkce dále používána. V této chvíli je definováno, že bude pokračovat od naposled nalezeného řádku uloženého v **row** a zda bude hledat nulu či nenulovou hodnotu. Výsledek je přičten zpět k hodnotě v **row**, což umožňuje pohybovat se v dokumentu, protože další hledání bude od toho místa pokračovat. Nezbytné je vždy odečíst jedničku od **row**, protože funkce jako výsledek vrací počet řádků, o které se byla potřeba posunout včetně řádku, na kterém začínala, jenže ten už je v **row** započtený.

Tímto je uložen první řádek po skončení relaxační periody. Následně je hledán konec nabíjení. Nalezením první nuly se program dostane na začátek relaxační periody. Po nalezení se program ve smyčce vrací a pokračuje hledáním další fáze CCCV testu, kde dochází k nabíjení.

Stěžejní je segment s HPPC daty. Jak je možné vidět na zdrojovém kódu níže, nalezení řádků je shodné jako v předchozím kroku, avšak před tím, než bude aktuální řádek uložen do **row** je potřeba, aby byl vrácen o 100 řádků. Je to z toho důvodu, že pro odpovídající parametry ECM je potřeba znát i jaké bylo napětí baterie při relaxační odezvě předcházejícího vybíjecímu impulzu. Obsah **row** je duplikován

do proměnné **ZacImp** (začátek impulzu), kde přetrvá do sestavení tabulky. Oblast dat pro relaxační periodu se ukládá celá do proměnné **KonImp**, až po začátek dalšího impulzu. Pro obdržení správných fitů je potřeba při měření relaxace dosáhnout ustáleného stavu.

```

%*****
row = row + findFirst(I(row:end) ~= 0, 1) - 100;
ZacImp = row; % Uložení řádku před impulzem HPPC
row = row + 99; % Začátek vybíjecího impulzu

row = row + findFirst(I(row:end) == 0, 1) - 1; % Konec impulzu
row = row + findFirst(I(row:end) ~= 0, 1) - 2; % Konec relaxace

KonImp = row; % Uložení řádku, konec relaxace

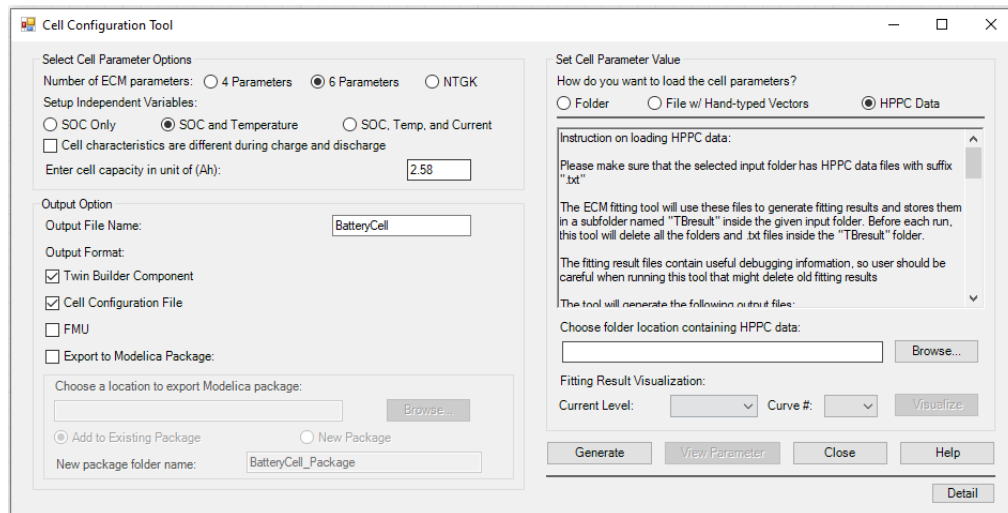
```

Program navazuje extrakcí dat do poznámkového bloku. Hodnoty nesoucí informace o tom, na kterých řádcích se nachází impulz a relaxace jsou uloženy v proměnných. Do poznámkového bloku je však potřeba zaznamenat čas a napětí. Pro čas jsou vybrány hodnoty počínaje indexem uloženým v **ZacImp**, až po řádek poznačený v **KonImp**. Tímto vznikne vektor hodnot, který začíná číslem odpovídajícím řádku, na kterém se nachází (to je například číslo 8004 pro první vybíjecí impulz), data však musí začínat od času 0, proto je **ZacImp** odečten od všech zapisovaných hodnot. Napětí žádné úpravy nevyžaduje, je ho pouze potřeba uložit tak, aby bylo ve druhém sloupci. Nakonec je tabulka společně s příslušnými informacemi o teplotě, SoC a vybíjecím proudu zapsána do poznámkového bloku a cyklus **for** může ve smyčce pokračovat k dalšímu vybíjecímu impulzu při nižší úrovni SoC. Důležitou součástí je nevkládat do názvu souboru diakritiku a speciální znaky, protože s nimi softwary Ansys nedokáží pracovat, případně je nelze ani importovat.

Z každého Excel souboru je vytvořeno 11 poznámkových bloků, jde o vybíjecí impulzy, jenž jsou zaznamenávány v rozmezí 100 % až 0 % SoC včetně. Pro lepší pokrytí chování baterie je tento proces použit pro Excel s profilem měření za teplot -5; 23,5 a 45 °C. Celkem je tedy připraveno 33 poznámkových bloků pro fit Twin Builderem.

4.4 Vytvoření ECM modulu

ECM modul se vytváří v prostředí Twin Builderu. Je k tomu použita funkce Battery Wizard, která je jednou z funkcí nástroje Toolkit. Po výběru konfigurace se otevře Configuration Tool, který slouží k fitování HPPC dat.

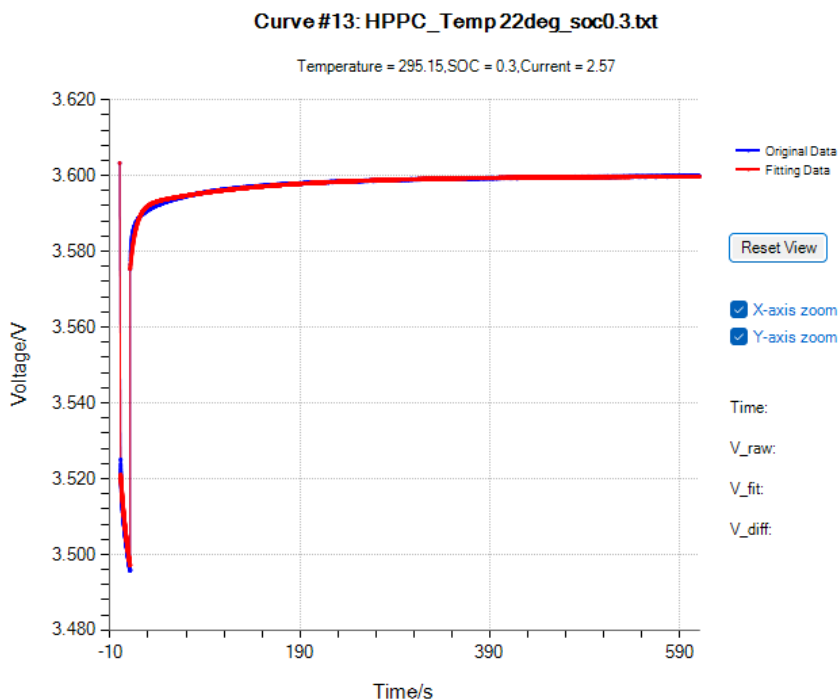


Obrázek 4.5 Configuration Tool

Nejprve je potřeba nastavit o jaký náhradní obvod půjde. Pro potřeby této práce je jako vhodný zvolen ECM se šesti parametry. Jedná se o napěťový zdroj, rezistor v sérii, který představuje vnitřní odpor a dvě paralelní větve tvořené rezistorem a kondenzátorem představující rychlé a pomalé jevy akumulátoru. Jako vstupní data jsou použity poznámkové bloky připravené v předchozí podkapitole. Při zadávání kapacity akumulátoru je potřeba volit aktuální hodnotu, v tomto případě tedy číslo o setiny nižší, než je kapacita uváděná výrobcem.

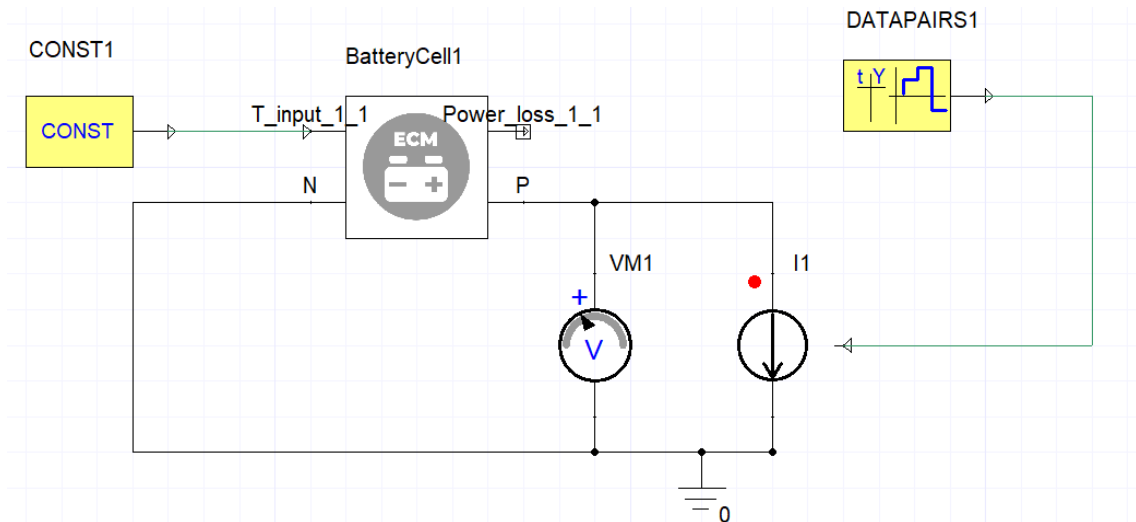
Výsledné fity všech charakteristik je možné zobrazit jako závislost napětí na čase. Graf obsahuje křivku pro fit vytvořený Twin Builderem a křivku nahreného průběhu pro porovnání. Hodnoty fitovaných komponent se ukládají společně s dalšími informacemi do složky TBresluts. Mezi ně patří i časové konstanty τ podle kterých je možné ověřit správnost fitu. Obecně časová konstanta charakterizuje rychlost změny veličin v dynamických systémech a je definována jako čas potřebný k tomu, aby systém dosáhl přibližně 63 % své konečné hodnoty. Hodnota τ_1 by měla odpovídat času

v začátku relaxace a τ_2 by měla být rovna času, kdy relaxace dosáhne zmiňovaných 63 % svojí velikosti, než se dostane do ustáleného stavu.



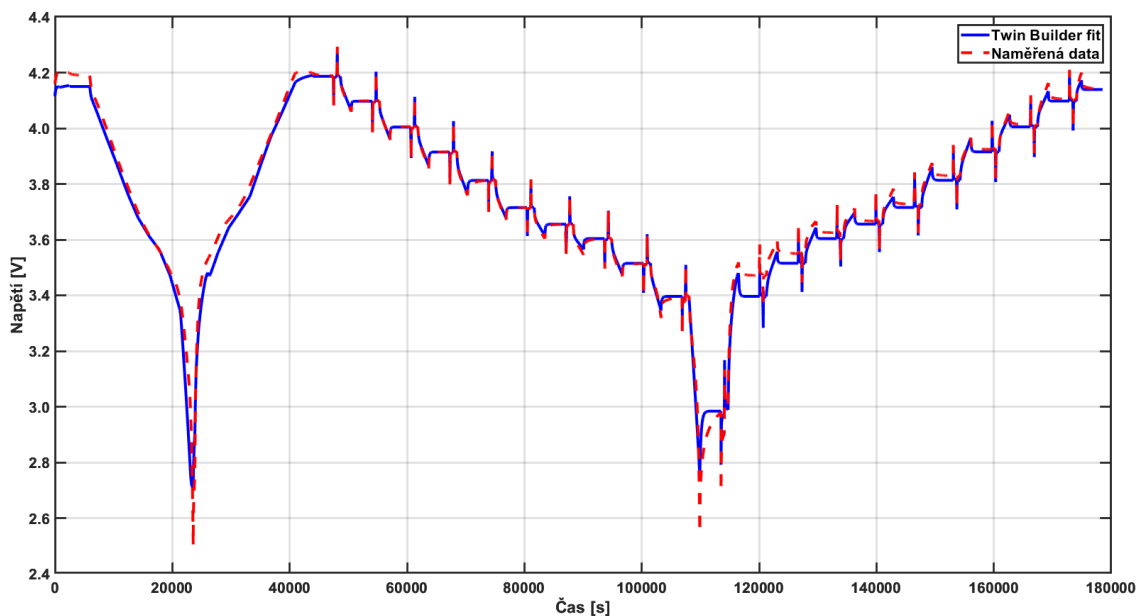
Obrázek 4.6 Závislost napětí na čase pro fit a naměřená data při 30 % SoC

Při fitování je vytvořena a přidána komponenta ECM do knihovny bloků. ECM je náhradním obvodem s odpovídajícími parametry, představuje tedy virtuální podobu lithium-iontového akumulátoru, která se při zátěži chová stejně jako její reálný protějšek. Z knihovny může být ECM vtažen na pracovní plochu Ansys Electronics Desktopu a lze s ním dále pracovat. Je možné k němu připojit proudový zdroj, jenž je řízený blokem DATAPAIRS. Schéma je znázorněno na obrázku 4.7. Do bloku je nahrán měřicí profil, který byl použit pro potenciostat a je odsimulován stejný průběh CCCV a HPPC testu virtuálně. U profilu je nezbytné změnit všechna znaménka proudů, poněvadž Twin Builder vyhodnocuje záporné hodnoty jako nabíjení a kladné jako vybíjení. Zároveň je možné nastavit stálou, či proměnnou teplotu a voltmetrem měřit napětí. Po spuštění výpočtu lze vynést napětí a proud do grafu a v potřebném formátu hodnoty uložit pro další zpracování.



Obrázek 4.7 Schéma zapojení pro měření napětí

Validaci ECM je možné provést vynesáním průběhu napětí vytvořeného Twin Builderem a napětí naměřené potenciostatem do jednoho grafu. Na obrázku 4.8 níže zobrazuje červená křivka hodnoty pro reálná data a modrá křivka simulovaná data. Opakované porovnávání výsledků přineslo poznatky pro možné úpravy fitovacích souborů. Nejpodstatnější bylo v souborech upravit hodnotu 0 % SoC na 0,001 % SoC.



Obrázek 4.8 Závislost napětí na čase pro porovnání fitovaných a naměřených dat

V blízkosti času 120 tisíc sekund dochází k odchýlení křivky simulovaných hodnot od naměřených. Je to způsobeno tím, že potenciostat má kvůli bezpečnosti omezení a proto vypíná dříve, než by bylo pro vykreslení charakteristiky potřeba. Z toho důvodu mají odezvy jednotkových skoků na začátku nabíjení vyšší hodnoty napětí. Posupně však dojde k ustálení napětí a křivky se znovu začnou překrývat.

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, tato práce hodnotí míru shody mezi naměřenými a simulovanými daty pomocí odmocniny střední kvadratické chyby (RMSE). Pro tyto dvě charakteristiky byla RMSE stanovena na hodnotu $2,44 \cdot 10^{-2}$ V za pomoci MATLABu.

Příklad výpočtu s dosazenými hodnotami:

$$\begin{aligned}
 RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{178530} \sum_{i=1}^{178530} (4,11 - 4,15)^2 + \dots + (4,13 - 4,14)^2} \quad (4.1) \\
 &= 2,44 \cdot 10^{-2} \text{ V}
 \end{aligned}$$

Postup výpočtu pro následující grafy je totožný, proto jsou dále uvedeny pouze výsledné hodnoty.

4.5 Model tepla – Ansys Fluent

Základem celého modelu tepla je správně charakterizovat fyzický akumulátor. K tomuto popisu jsou zásadní dvě věci, první z nich je vymodelování 3D geometrie ve vhodném CAD systému, který následně bude kompatibilní s ostatními softwary. Geometrie poskytuje rozměry a okrajové podmínky pro simulaci tepla. Druhou podstatnou částí je fyzikální popis baterie, jde tedy o materiály, ze kterých se akumulátor skládá a vlastnosti těchto materiálů.

Pro vytvoření 3D geometrie byl použit software SOLIDWORKS, kde byl vymodelován válec o průměru podstavy 18 a výšce stěny 65 milimetrů, vzhledem

k tomu, že měřený akumulátor je formátu 18650. V tuto chvíli je 3D model vytvořen, ale před použitím je potřeba jej ještě zasítovat. Vytvoření sítě se provádí v Ansys Workbench, nejprve jsou definovány jednotlivé části, jako je kladný a záporný kontakt akumulátoru pomocí named selection a následně je vygenerována síť o jemnosti 0,1 milimetru. Pak je možné zasítovaný model exportovat jako soubor typu .msh.

V dalším kroku bylo úkolem popsat vlastnosti materiálů, ze kterých je akumulátor vyroben. Jedná se o chemii NMC a bylo zapotřebí zjistit charakteristické vlastnosti kolektorů, elektrod a separátoru. Odpovídající hodnoty byly vyhledány v dokumentech od výrobce a z odborné literatury, kde byly vlastnosti stanoveny použitím empirických metod. Zjištěné a vypočtené hodnoty jsou shrnuty v tabulce 4.1. Jedna poznámka se váže k tepelné kapacitě, která je v literatuře udávána ve třech možných zápisech a to jako axiální, radiální a tangenciální. Tyto tři možnosti jsou dány anizotropií akumulátoru. Jelikož jde o cylindrický akumulátor, je aktivní materiál vytvořen navinutím materiálů do válce a poté zapouzdrněním. Právě navinutá struktura umožňuje rychlejší nebo pomalejší vedení tepla v závislosti na směru. V axiálním a tangenciálním směru je tepelná vodivost až o řád vyšší, jelikož teplo prostupuje jedním materiálem. Zatímco v radiálním směru je šíření tepla zpomaleno mnoha vrstvami, které tvoří aktivní materiál. Je tedy zapotřebí tyto složky vhodně zvolit, aby model tepla odpovídal reálným datům.

Tabulka 4.1 Vlastnosti materiálů akumulátoru [43]

Materiál	P kolektor	P elektroda	Separátor	N elektroda	N kolektor	Celkem
δ (m)	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$
ρ (kg/m ³)	2700	4140	900	1900	8700	2950,82
C_p (J/kg·K)	900	700	1883	881	396	911,03
λ (W/m·K)	237	1,48	0,5	1,04	398	31,55
σ (S/m)	$3,77 \cdot 10^7$	3,8	-	100	$5,8 \cdot 10^7$	-
					σ_p (S/m)	$2,20 \cdot 10^6$
					σ_n (S/m)	$2,43 \cdot 10^6$

Kde jednotlivé veličiny značí:

δ tloušťka vrstvy (m)

ρ hustota (kg/m^3)

C_p tepelná kapacita za konstantního tlaku ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

λ součinitel tepelné vodivosti ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

σ_p elektrická vodivost kladného kontaktu (S/m)

σ_n elektrická vodivost záporného kontaktu (S/m)

Níže jsou uvedeny vzorce použité při výpočtu tabulky:

$$\delta_{\text{total}} = 0,5 \cdot \delta_c^p + \delta_e^p + \delta_s + \delta_e^n + 0,5 \cdot \delta_c^n \quad (4.2)$$

$$x_{\text{eff}} = \frac{0,5 \cdot x_c^p \cdot \delta_c^p + x_e^p \cdot \delta_e^p + x_s \cdot \delta_s + x_e^n \cdot \delta_e^n + 0,5 \cdot x_c^n \cdot \delta_c^n}{\delta_{\text{total}}} \quad (4.3)$$

Kde x_{eff} značí výslednou hodnotu pro danou fyzikální veličinu aktivního materiálu, δ značí tloušťku vrstvy materiálu s příslušnými indexy c – kolektor proudu, e – elektroda, s – separátor, p jako kladná a n jako záporná elektroda.

Příklady výpočtu pro třetí řádek tabulky:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{total}} &= 0,5 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} + 8 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-5} \\ &\quad + 8,8 \cdot 10^{-5} + 0,5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \\ &= 2,15 \cdot 10^{-4} \text{ m} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} x_{\text{eff}} &= \frac{0,5 \cdot 900 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} + 700 \cdot 8 \cdot 10^{-5} + 1883 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} \\ &\quad + 881 \cdot 8,8 \cdot 10^{-5} + 0,5 \cdot 396 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}}{2,15 \cdot 10^{-4}} \\ &= 911,03 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Všechny následující úkony při tvoření modelu tepla jsou prováděny v softwaru Ansys Fluent, kam je nejprve importována zasítovaná geometrie akumulátoru. V raných fázích řešení byly simulace prováděny na Circuit Network modelu. Jeho výhodou je, že počítá pouze teplo, nikoliv potenciál a dynamiku tekutin. To napomáhá rychlým výpočtům

na úkor přesnosti výsledku, což je pro prvotní kalibraci modelu vyhovující. Po kalibraci byly výpočty dále prováděny za použití multifyzikálního modelu MSMD (Multi-Scale Multi-Domain), který kombinuje jak teplo, tak elektrický potenciál.

Charakterizace elektrických vlastností je tu stejně jako v předchozí kapitole provedena stanovením parametrů náhradního elektrického obvodu z HPPC dat použitím fitovacího algoritmu Jiang-Hu. Ansys Fluent nabízí také další fitovací metodu pomocí algoritmu Levenberg-Marquardt, která se však při uplatnění ukázala jako méně přesná. Dalším způsobem, který Fluent podporuje je pak popis chování pomocí polynomů například z elektrochemické impedanční spektroskopie. Pro simulaci výsledné charakteristiky slouží tabulka s proudovým profilem uspořádaným podle času.

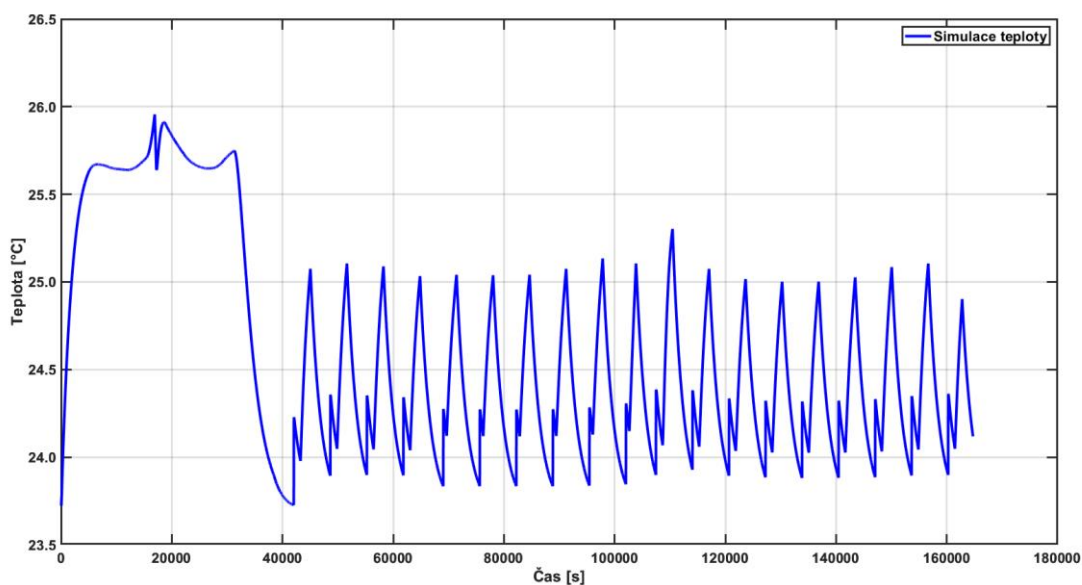
Jelikož databáze Fluentu neposkytuje požadovaný materiál, je zapotřebí jej definovat. K tomuto účelu byly použity dříve vypočtené hodnoty. Konkrétní hodnoty jednotlivých veličin pro popis aktivního materiálu jsou poznačeny v tabulce 4.2. Níže definovaný aktivní materiál byl následně přiřazen geometrii akumulátoru.

Tabulka 4.2 Vlastnosti aktivního materiálu

Vlastnost	Hodnota
Hustota	2950 kg/m ³
Tepelná kapacita za konstantního tlaku	911 J/kg·K
Tepelná vodivost axiální	31,55 W/m·K
Tepelná vodivost radiální	2 W/m·K
Měrná elektrická vodivost	2,43·10 ⁶ S/m

Navazuje stanovení okrajových podmínek, které je potřeba definovat na všech stěnách akumulátoru. Jako okrajová podmínka byla nastavena konvekce o koeficientu odvodu tepla 5,6 W/m²·K a teplotě okolního prostředí 296,83 K. Stejná teplota byla nastavena i jako počáteční podmínka pro inicializaci simulace. Pro odlehčení výpočetní zátěže je ještě vhodné vypnout rovnice pro proudění a turbulence. Poté jsou definovány veličiny, které je potřeba odměřit a zaznamenat. Tomu následuje inicializace, která nastaví počáteční podmínky. Ještě před spuštěním simulace, jelikož jde o tranzientní úlohu, je nastaven počet časových kroků, délka kroku a kolik bude provedeno iterací v každém

kroku. Výpočet simulace trval 26,5 hodiny. Výsledek simulace teploty je znázorněn na obrázku 4.9.

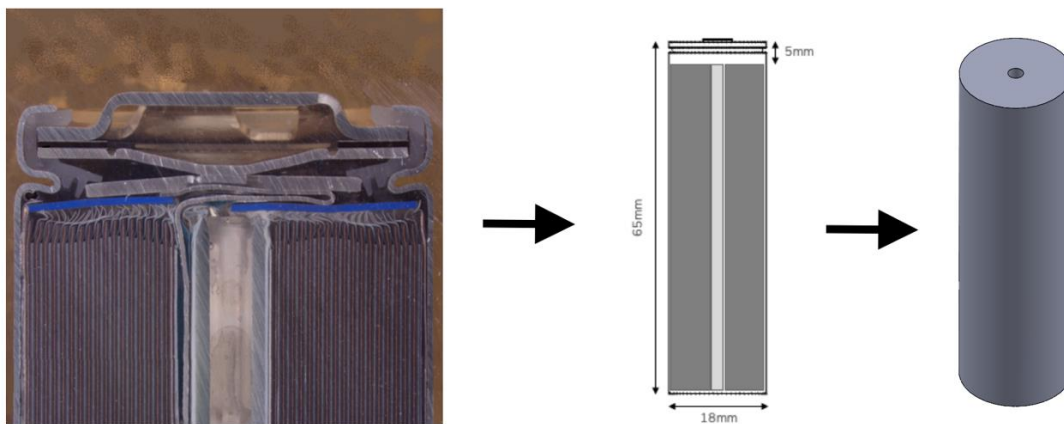


Obrázek 4.9 Simulace teploty v Ansys Fluent

4.5.1 Verifikace a kalibrace modelu tepla

Verifikace obnáší posouzení, zda je model vytvořen správně, tedy jestli zachycuje veškeré prvky chování, které lze předpokládat na základě znalostí fyzikálních zákonů a předešlých zkušenostech s obdobnými měřeními. Již z charakteristiky proudového profilu lze dedukovat, že k nárůstu tepla dochází ve správné časové okamžiky odpovídající vybíjení a nabíjení. Také bylo ověřeno, že jemnost sítě je dostačující a není zapotřebí síť zjemňovat za účelem potlačení diskretizace modelu. Nicméně dochází i k několika nesrovnalostem, kvůli kterým bude nutné model dopravit. Geometrie akumulátoru odráží tvar krytu, nikoliv skutečné rozměry aktivního materiálu. Co se týče skokových pulzů v HPPC části, splynuly i s odezvou v jedno maximum. Z těchto důvodů je zapotřebí upravit geometrii a model kalibrovat.

Ve 3D geometrii akumulátoru je zapotřebí provést dvě změny vyplývající z průřezu baterií na obrázku 4.10 vlevo. Veprostřed akumulátoru je prázdná dutina, která zůstala po navinutí vrstev materiálů do cylindru. Dále výška aktivního materiálu je pouze zhruba 60 milimetrů, jelikož se pod kladným kontaktem nachází PTC termistor, disky pro přerušování proudu a ventil. Je proto potřeba rozměry zmenšit a přidat duté jádro.



Obrázek 4.10 Průřez akumulátorem 18650 a rozměry nové 3D geometrie [44][45]

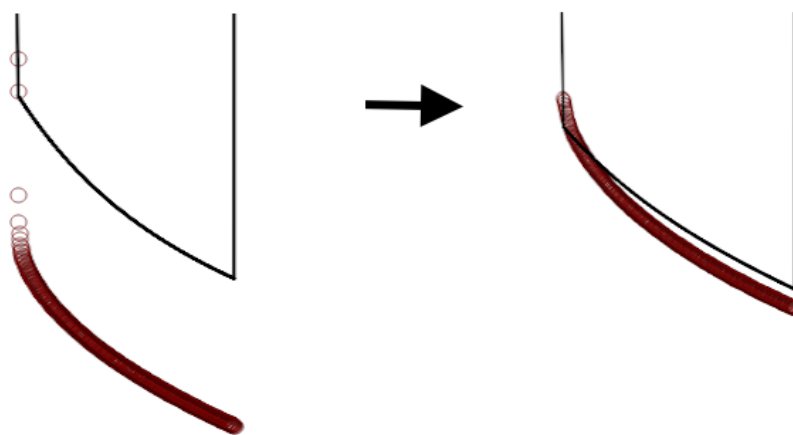
Akumulátory jsou standardně kryty izolačním obalem z polymeru, ve většině případů je používán PET (polyethylentereftalát) nebo PVC (polyvinylchlorid). Vrstva obalu má tloušťku přibližně 0,1 milimetru a při výrobě se zahřátím smrští tak, aby pokryla povrch baterie vyjímaje kladný a záporný kontakt. Ve Fluentu byl tedy definován další materiál, jehož vlastnosti jsou poznačeny v tabulce 4.3 níže. Vrstva polymeru byla přidána mezi okrajové podmínky jako stěna s tloušťkou 0,1 milimetru včetně definování vlastností materiálu. Tento způsob je příznivější, v porovnání s přidáváním vrstvy do geometrie, která by nadměrně komplikovala síť. Mimo jiné bylo také uvaženo šíření tepla způsobem radiace, avšak k přesnějším výsledkům tato změna nepřispěla, proto emisivita v dalších simulacích již nebyla zahrnuta.

Tabulka 4.3 Vlastnosti obalu akumulátoru

Vlastnost	Hodnota
Hustota	1388 kg/m ³
Tepelná kapacita za konstantního tlaku	1040 J/kg·K
Tepelná vodivost	0,13 W/m·K
Měrná elektrická vodivost	1·10 ⁻⁸ S/m

V rámci kalibrace modelu byly pozměněny i vlastnosti aktivního materiálu, kde bylo zjištěno, že je vhodnější axiální tepelnou vodivost nastavit na 20 W/m·K a radiální na 1 W/m·K. Fitovací data bylo také zapotřebí upravit, vzhledem k vysoké frekvenci

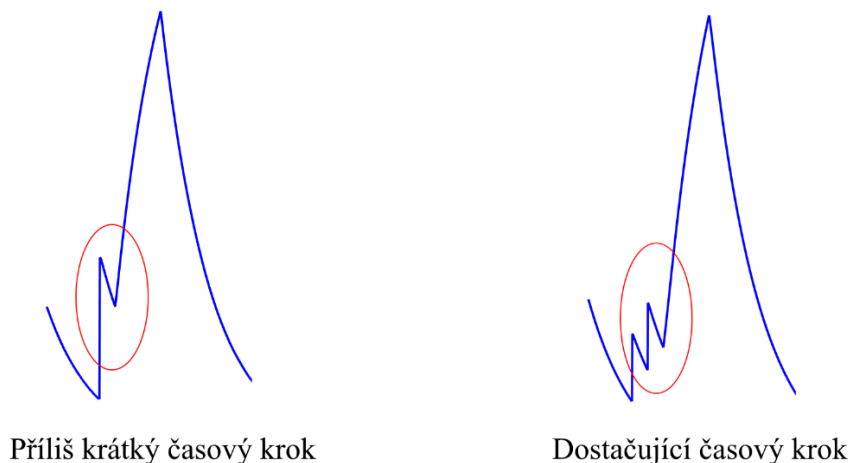
vzorkování byly do naměřených dat vneseny artefakty. Ve Fluentu dochází k nekvalitním fitům v případě, že se nachází body hodnot mezi ustáleným stavem a začátkem vybíjecího pulzu. Z obdobných důvodů vznikají problémy v části mezi koncem vybíjecího pulzu a napěťovou odezvou. Naměřené hodnoty v mezikrocích bylo zapotřebí posunout na správné místo, aby nedegradovaly kvalitu fitů. Tento negativní dopad je zapříčiněn tím, že při fitu má na výsledek největší vliv první hodnota pulzu a hodnota jí předcházející. Fit napětí před a po úpravě je znázorněn na obrázku 4.11, kde černá křivka představuje naměřená data a červené kroužky značí fit. V neposlední řadě bylo ještě zapotřebí délku odezvy zkrátit.



Obrázek 4.11 Detail poklesu napětí při 40 % SoC před a po úpravě

Jak bylo na začátku pojednání o verifikaci zmíněno, simulace nestíhá zaznamenat odezvy mezi vybíjecím a nabíjecím pulzem, naopak průběh teploty v této části spojí do jednoho maxima. Průběhy přítomný a opravený jsou znázorněny níže na obrázku 4.12. Nesprávné vykreslení je způsobeno nedostatečným časovým krokem, který není schopen zachytit odezvu mezi proudovými pulzy. S cílem opravit tuto nesrovnalost byla úloha odsimulována při časových krocích 50; 30; 20; 11; 10 a 9 sekund. Při nižších časových krocích se dařilo odezvu mezi krátkými pulzy zachytit, avšak ne spolehlivě. Jelikož je proudový profil periodicky uspořádán a odezvy na jednotkový skok jsou měřeny po každých deseti procentech SoC, často docházelo k tomu, že napoprvé byla odezva zachycena, ale po dalším vybití již nikoliv. Možností také bylo nastavit časový krok na 1 sekundu, což však není

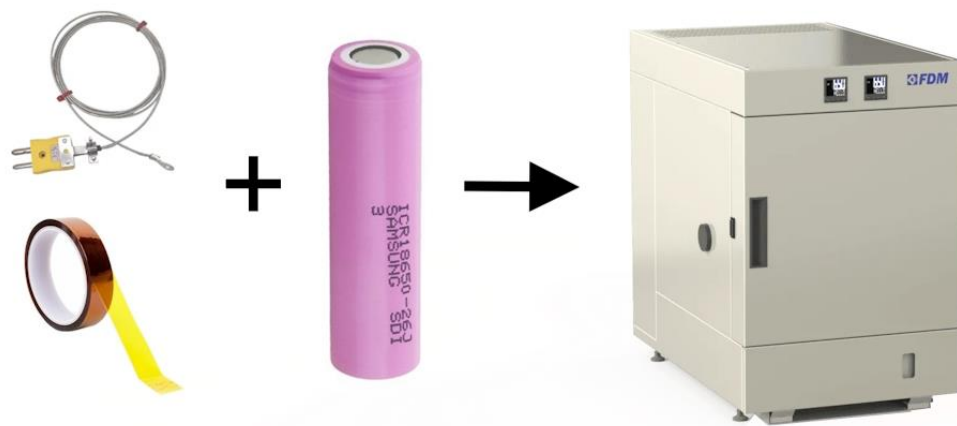
vhodné z hlediska doby trvání simulace. Poté bylo zjištěno, že Twin Builder tyto odezvy zaznamenávat zvládá a jako nejrychlejší, ale stále dostatečně přesný byl pro simulace zvolen časový krok 20 sekund.



Obrázek 4.12 Výsledek simulace časových kroků

4.5.2 Validace modelu tepla

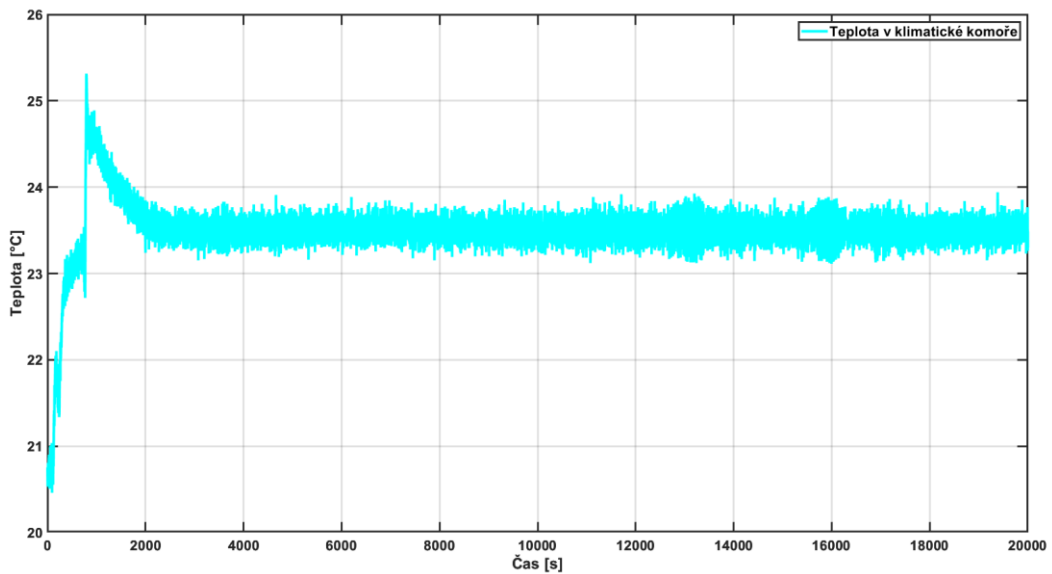
Následující text se věnuje validaci modelu tepla, jde tedy o ověření, zda dochází ke shodě mezi originálními daty naměřenými na původním systému a daty vytvořenými simulací. Tímto bude zajištěno, že model reflektuje chování testovaného akumulátoru. Data pro validaci teploty jsou měřena pomocí termočlánku připevněného na pouzdro baterie kaptonovou páskou, která je vysoce stabilní při nízkých i vysokých teplotách. Z důvodu potlačení možných výkyvů okolní teploty je celé měření prováděno uvnitř klimatické testovací komory, jak znázorňuje obrázek 4.13. Aby bylo dosaženo robustního modelu pro tvorbu digitálního dvojčete, v klimatické komoře jsou postupně nastavovány teploty -5; 23,5 a 45 °C, dochází tedy k naměření tří různých souborů s daty. Současně byla v průběhu měření, kromě dat zaznamenávaných na povrchu baterie, snímána také teplota uvnitř komory. Hodnoty pro každou jednu úroveň teploty byly potenciostatem shromažďovány po dobu 51 hodin.



Obrázek 4.13 Měření teploty akumulátoru

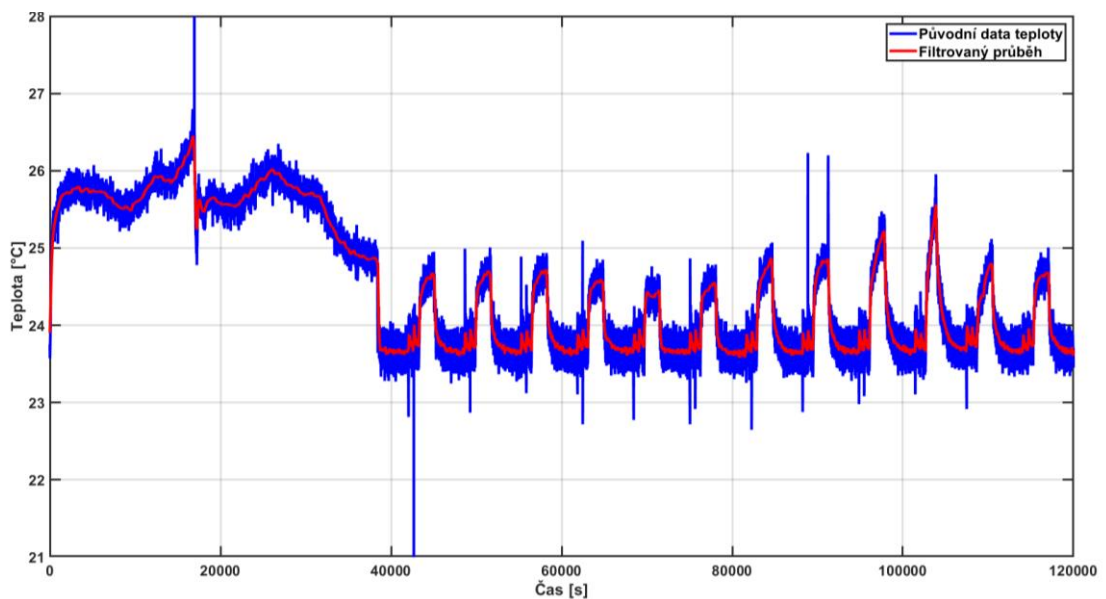
Průběh teploty v klimatické komoře je zaznamenán v grafu na obrázku 4.14. Na počátku měření, bezprostředně po spuštění, došlo k nárazovému nárůstu teploty. Jak je z grafu patrné, po uplynutí 2 tisíc sekund došlo k ustálení na 23,5 °C a teplota se již po zbytek měření pohybovala v odpovídajících mezích. V důsledku prudkého výkyvu teploty došlo ke zkreslení první části měřených dat. Z toho důvodu jsou následující grafy vykreslovány až od části CCCV měření, kde již data nejsou negativně ovlivněna.

Ve Fluentu je možné teplotu naměřenou v klimatické komoře vložit jako okrajovou podmínku. To má však za následek, že simulovaná data jsou ovlivněna kmity křivky teploty naměřené termočlánkem. Kmity by bylo možné odstranit zprůměrováním buď dat z komory anebo průměrem finální simulované křivky. V tomto okamžiku je však snadnější nastavit okrajové podmínky konstantní teplotou, která má obdobný vliv jako hodnoty z komory, jež se drží v mezní blízkosti 23,5 °C. Dále bylo předpokládáno, že lze data z komory zkombinovat se simulací tak, aby vrcholy v simulované křivce byly sníženy, jak je tomu u reálných dat. Nicméně, při realizaci nebylo dosaženo očekávaného výsledku a proto se přistoupilo k následnému zpracování naměřených dat.



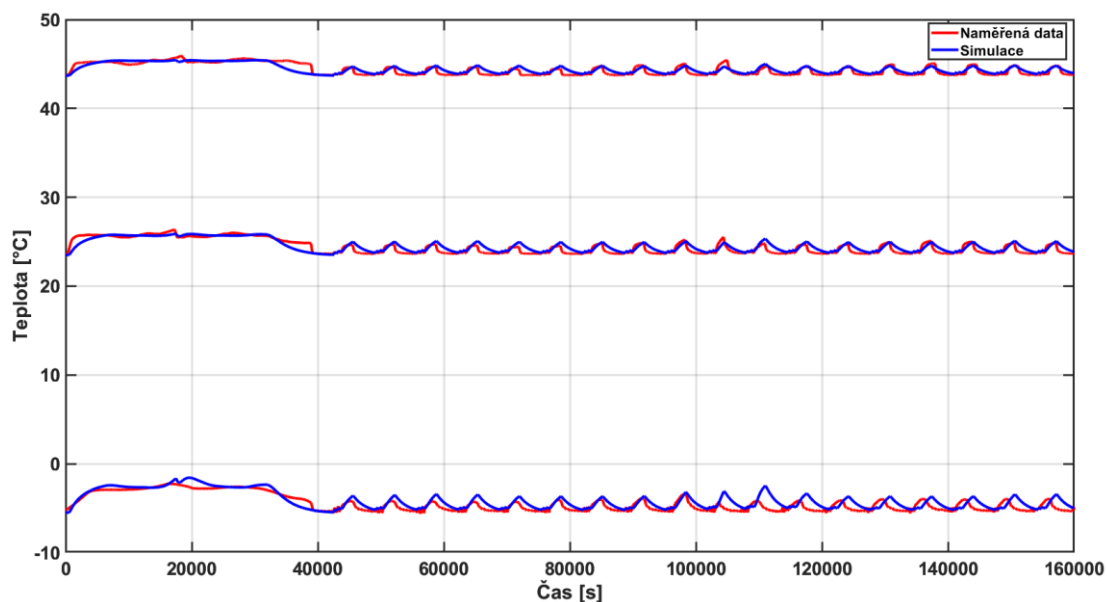
Obrázek 4.14 Teplota v klimatické komoře

Jak popisuje předchozí odstavec, při měření teploty dochází k četným kmitům, což je patrné i z grafu na obrázku 4.15. Také si lze například v časech 17 a 42 tisíc sekund všimnout peaků dosahujících extrémních hodnot, jedná se o šum. Kmity by komplikovaly validaci dat ze simulace, a proto je namístě je eliminovat. K tomu je použit MATLAB, kdy je za využití filtrů **medfilt1** a **filtfilt** společně s **fir1** křivka zprůměrována. Takto upravená křivka je již vhodná k použití při validaci, jelikož značí konkrétní body.

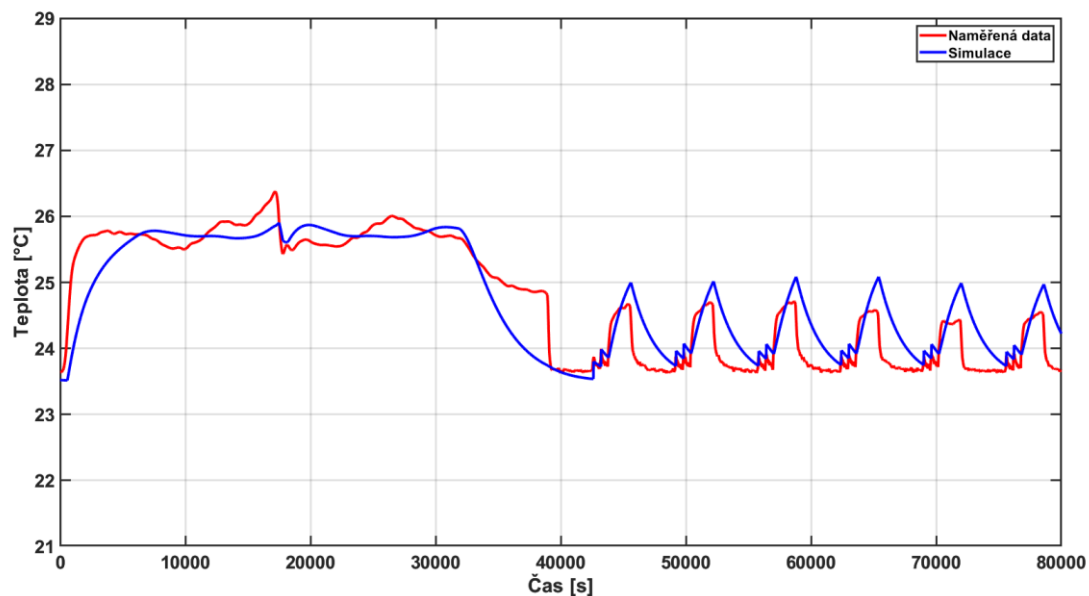


Obrázek 4.15 Filtr naměřeného průběhu teploty

Nyní je tedy možné přistoupit k validaci, níže se nachází dva grafy, na prvním obrázku 4.16 jsou porovnána data naměřená a data vytvořená simulací při všech třech teplotních úrovních. Jelikož jsou křivky relativně dlouhé, pro lepší přehlednost je na následujícím obrázku 4.17 znázorněn detail průběhů při teplotě 23,5 °C.



Obrázek 4.16 Porovnání naměřených a simulovaných dat pro tři teploty



Obrázek 4.17 Porovnání naměřených a simulovaných dat pro teplotu 23,5 °C

Jak lze pozorovat na obrázku 4.17, jsou zde určité oblasti, ve kterých nedochází k uspokojivému překrytí křivek. Jde například o část úplného vybití akumulátoru nacházející se v čase 17 tisíc sekund, oproti očekávání je dosažené maximum v simulaci nižší, než naměřená data. Dále simulovaná křivka přesně nekopíruje průběh teploty snímané termočlánkem v maximech při vybíjení během HPPC měření. V reálných datech nedochází k tak vysokým vrcholům, protože jsou redukovány chlazením komory. Ze stejného důvodu i pokles teploty při odezvě na vybíjení klesá strměji v porovnání se simulovanými daty. To má za následek, že zvýšení teploty v reakci na jednotkové skoky začíná v simulaci na vyšších hodnotách a dochází tedy ke zkreslení.

Tyto zmíněné skutečnosti jsou zapříčiněny především tím, že akumulátor v klimatické komoře byl osazen pouze jedním termočlánkem a to na povrchu pouzdra baterie. Zatímco výpočet ve Fluentu vychází výhradně z teploty naměřené uvnitř akumulátoru, což je v běžných podmínkách obtížně proveditelné. Také se projevuje, že termočlánek na akumulátoru měří bodově, zatímco v simulaci je teplota měřena pomocí mnoha virtuálních senzorů, ze kterých je následně vypočítána průměrná hodnota. Simulace je také do značné míry idealizovaná a proto bude docházet k odchýlkám.

Jako další možný vliv lze uvažovat to, že termočlánek byl na akumulátor připevněn kaptonovou páskou, což mohlo negativně ovlivnit odvod tepla do okolí. Za dalšího činitele přispívajícího ke zkreslení výsledku lze považovat zprůměrování naměřených dat akumulátoru, viz obrázek 4.15. Finální výsledek však slouží pro validaci modelu a kontrolu, zda se maxima nacházejí ve správných místech, čemuž graf odpovídá a výše zmíněné nepřesnosti tak lze tolerovat. V případě požadavku na dosažení ideálního překryvu obou křivek nabízí Ansys řešení pomocí softwaru optiSLang. Tímto způsobem jsou v praxi řešeny úlohy vyžadující vysokou přesnost, proces zpřesnění je však časově a finančně náročný a vyžaduje zkušené odborníky. Hodnota RMSE byla pro výše uvedený graf stanovena na 0,29 °C.

4.5.3 Redukovaný model tepla

V předchozím textu bylo shrnuto, jak simulovat průběh teploty pomocí fyzikálního modelu. Výpočet je však výkonově a především časově náročný a tyto modely by nebylo možné uplatnit u digitálního dvojčete, které pracuje v reálném čase. Trendem

je tedy přistupovat k řešení použitím redukováných modelů. Jde o nahrazení systému black boxem, který na základě hodnot na vstupu dokáže na výstupu vrátit výsledky dostatečně přesné na to, aby jím mohl být fyzikální model nahrazen.

Ovšem rychlost redukováných modelů neznamena, že by bylo možné předchozí simulace z postupu vypustit, jelikož právně díky nim je redukováný model možné vytvořit. Multifyzikální simulace jsou základem pro sběr trénovacích dat, která je potřeba zpracovat a poté je z nich možné vytvořit redukováný model. V případě této práce jsou trénovací data vyhotovena v softwaru Fluent a redukováný model ve Twin Builderu. Data tedy není nutné upravovat, protože oba programy spadají do portfolia společnosti Ansys a jsou plně kompatibilní.

Pro trénovací data je nejprve nezbytné připravit stejný model jako pro fyzikální simulaci s výjimkou nastavení proudu a dalších vstupních parametrů. Zadané materiály a okrajové podmínky tedy zůstávají stejné, testovací data se ve Fluentu vytváří pomocí funkce Battery ROM Tool Kit, kde je důležité nastavit hodnoty, jež jsou zaznamenány v tabulce 4.4 pod tímto odstavcem. Typ modelu je lineární časově neměnný, zvolen je tedy LTI a u nastavení proudu je potřeba vybrat Joulovo teplo.

Tabulka 4.4 Nastavení parametrů pro vytvoření trénovacích dat

Parametr	Hodnota
Generované teplo v objemu akumulátoru	10 W
Proud pro výpočet ohmického ohřevu	1 A
Počáteční délka časového kroku	0,1 s
Maximální délka časového kroku	100 s
Inkrement časového kroku	1,1
Počet kroků	10
Maximální počet iterací pro jeden časový krok	15
Maximální čas výpočtu	36000 s
Podmínka konvergence	0,001

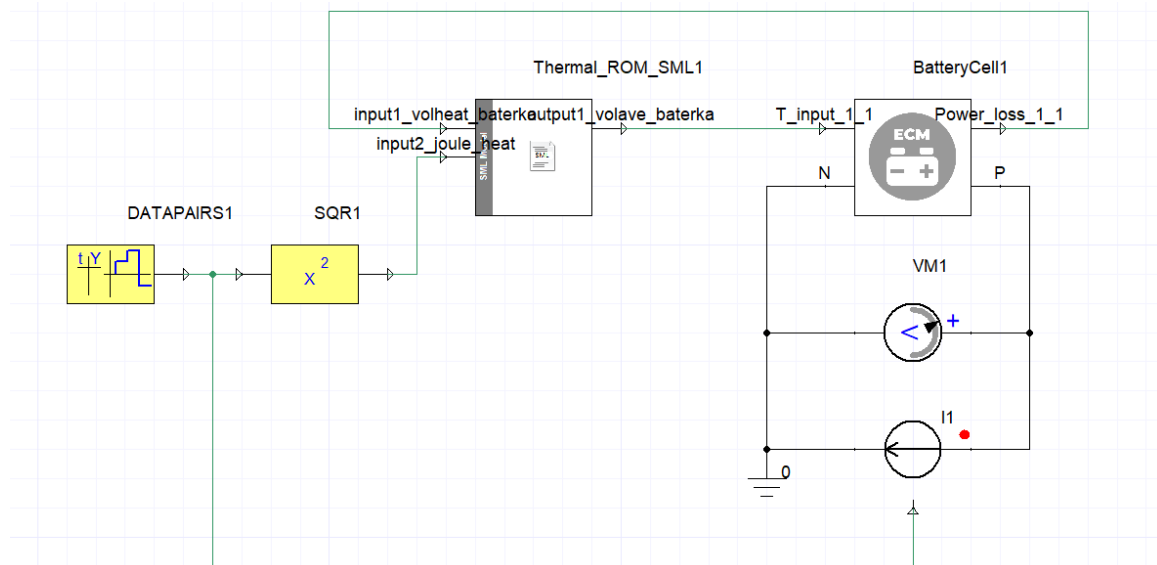
Po dokončení výpočtů jsou trénovací data ve formě čtyř souborů uložena do složky s označením „LTI“. Soubory obsahují názvy vstupních portů, nastavené parametry, vypočtené ohmické ztráty a průběh teploty. Tímto způsobem je soubor připravený pro použití ve Twin Builderu. Po aktivaci funkce Thermal Model Identification,

nastavení počtu vstupů, výstupů a vložení složky s trénovacími daty dojde k vygenerování redukovaného modelu. Jak bylo v předchozím textu uvedeno, výpočet původní multifyzikální simulace trval 26,5 hodiny. Redukovaný model tuto rychlost mnohonásobně převyšuje, stejný výpočet zvládne provést za pouhé tři sekundy.

4.6 Digitální dvojčce akumulátoru

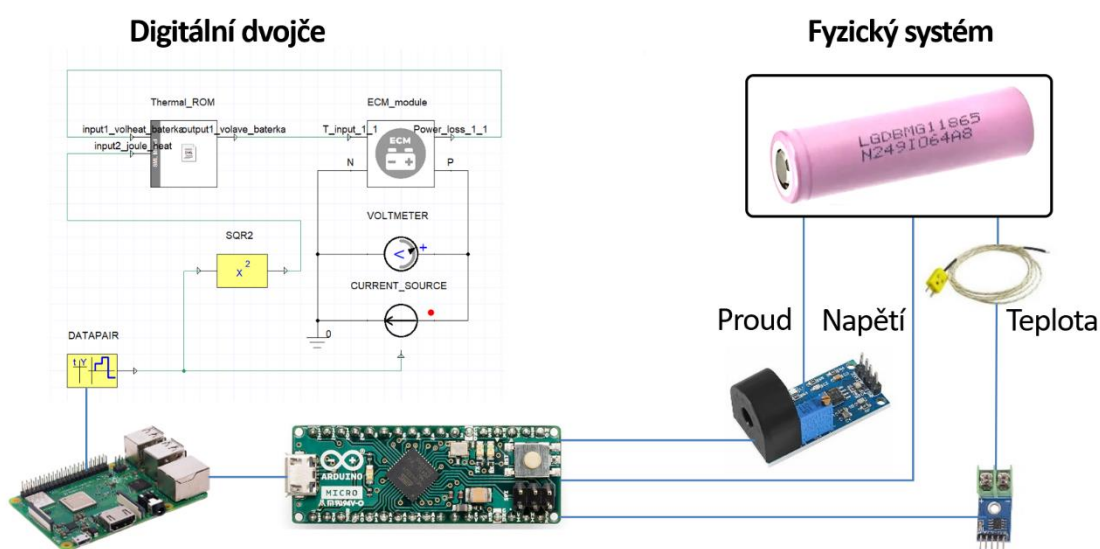
Tato část se věnuje vytvoření digitálního dvojčete Li-Ion akumulátoru, hlavního cíle této diplomové práce. Dosud text popisoval tvorbu elektrického modelu a modelu tepla, nyní jsou oba kompletní a lze přistoupit k jejich propojení. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 4.18. Blok DATAPAIRS1 nacházející se v levé části schématu slouží pro vkládání dat do digitálního dvojčete. V případě tohoto schématu jde o data proudu. Spodní větev slouží pro řízení proudového zdroje. V horní větvi hodnoty jdoucí na vstup do redukovaného modelu (Thermal_ROM_SML1) představují ohmické ztráty. Data nejprve prochází blokem SQR1, kde je proveden výpočet jejich druhé mocniny. Tento krok je nezbytný, jelikož ztrátový výkon má lineární vztah s druhou mocninou proudu.

Oba bloky jsou vzájemně propojeny, z výstupu redukovaného modelu je odesílána průměrná teplota zaznamenávaná v objemu akumulátoru do elektrického modelu (BatteryCell1). Současně je model tepla ovlivňován zpětnou vazbou z elektrického modelu, který mu poskytuje informace o ztrátách.



Obrázek 4.18 Schéma zapojení digitálního dvojčete

Po vytvoření digitálního dvojčete je možné přistoupit k propojení s Li-Ion akumulátorem. Obrázek 4.19 schématicky zobrazuje propojení mezi oběma systémy. Fyzický systém je osazen termočlánky pro snímání teploty, současně je monitorován proud a napětí. Všechna tato data jsou zpracovávána Arduinem sloužícím jako A/D převodník, konvertuje tedy analogová data na digitální signál. Následně jsou shromažďována v Raspberry Pi, odkud jsou odesílána do počítače s digitálním dvojčetem. Zpracování dat zde probíhá lokálně, zatímco v průmyslu simulace standardně probíhají formou cloudových výpočtů na vzdáleném serveru, kde jsou i ukládány výsledky, aby z nich mohly být prováděny prediktivní analýzy a prognózování.



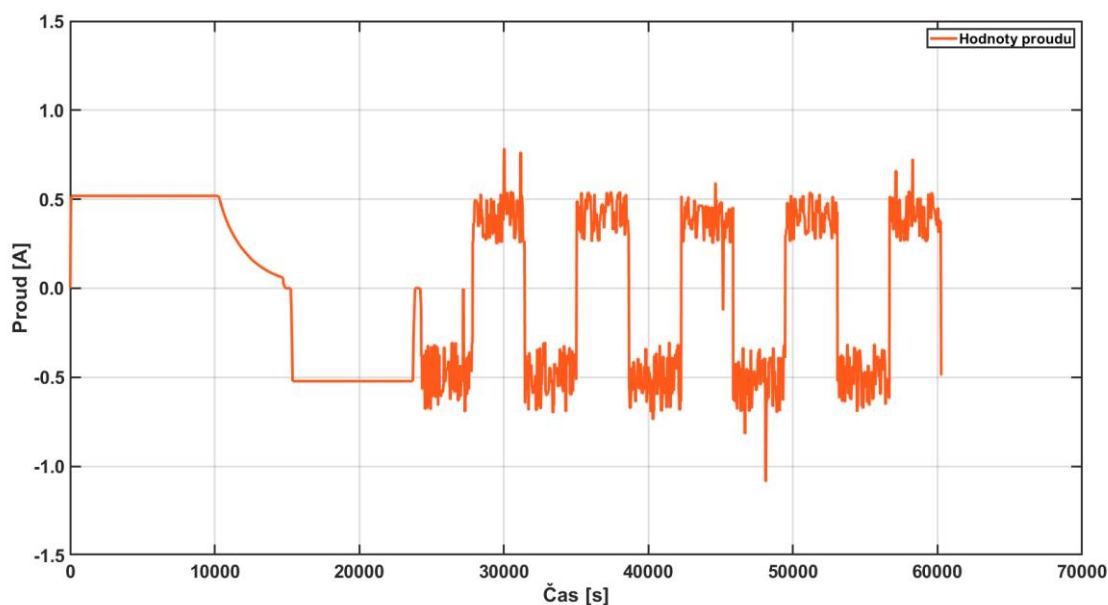
Obrázek 4.19 Znáznornění propojení digitálního dvojčete a akumulátoru

4.7 Testovací profil

Dosud znázorněné grafy předložily přesnost elektrického modelu v porovnání s daty, ze kterých byl vytvořen. Bylo tedy možné očekávat vysokou podobnost obou charakteristik. Nicméně, pro ověření robustnosti a správného fungování elektrického modelu je zapotřebí, aby byl porovnán s daty jinými, než ze kterých byl vytvořen. Takovýto profil pro validaci by měl obsahovat jak pulzy, tak nabíjení či vybíjení o délkách a hodnotách proudů jiných, v porovnání s těmi, ze kterých byl elektrický model vytvořen. Pro takovýto testovací profil je v MATLABu možné použít například funkci **randi** k vygenerování náhodných délek vybíjení, jelikož se jedná o celá čísla.

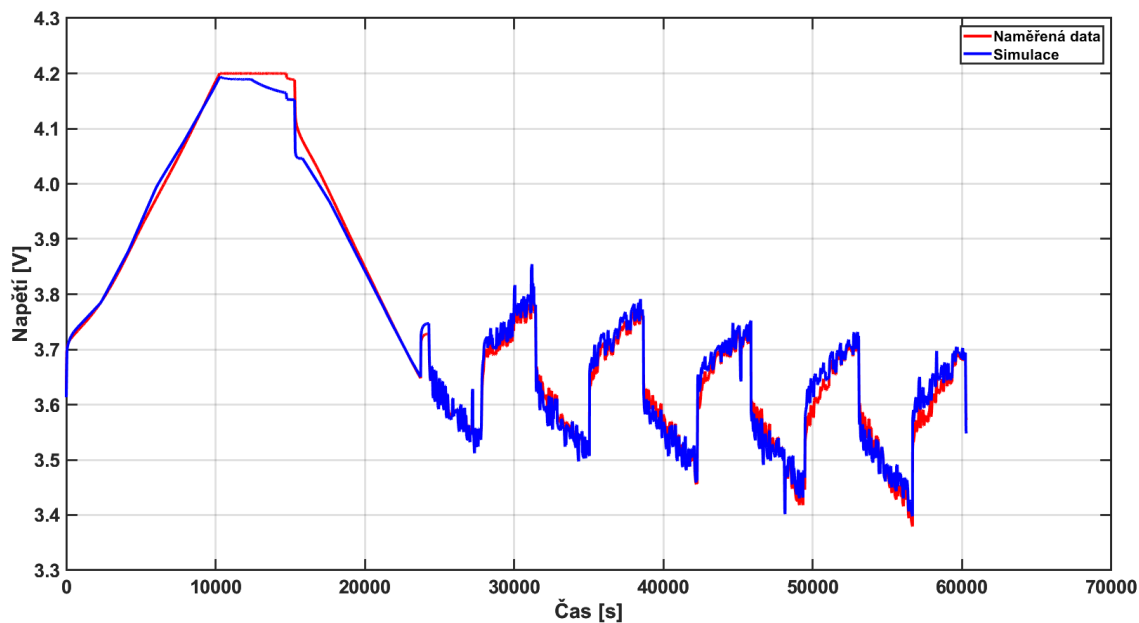
Případně pak náhodné hodnoty proudů lze vytvořit funkcí **rand**, jež vrací reálná desetinná čísla mezi 0 a 1. Díky těmto náhodně generovaným hodnotám je zajištěna podobnost profilu reálným podmínkám a může sloužit pro efektivní kontrolu robustnosti, odsud je také získán název random profil.

Pro tento konkrétní náhodně vygenerovaný testovací profil, viz obrázek 4.20, byla použita vyšší pravděpodobnost pro vygenerování vyšších hodnot proudu. V reálných podmínkách by takovýto profil mohl představovat akumulátorové úložiště kombinující nabíjení stochastického charakteru z obnovitelných zdrojů (například fotovoltaické elektrárny) a během nočních hodin z elektrické sítě za využití nízkého tarifu.

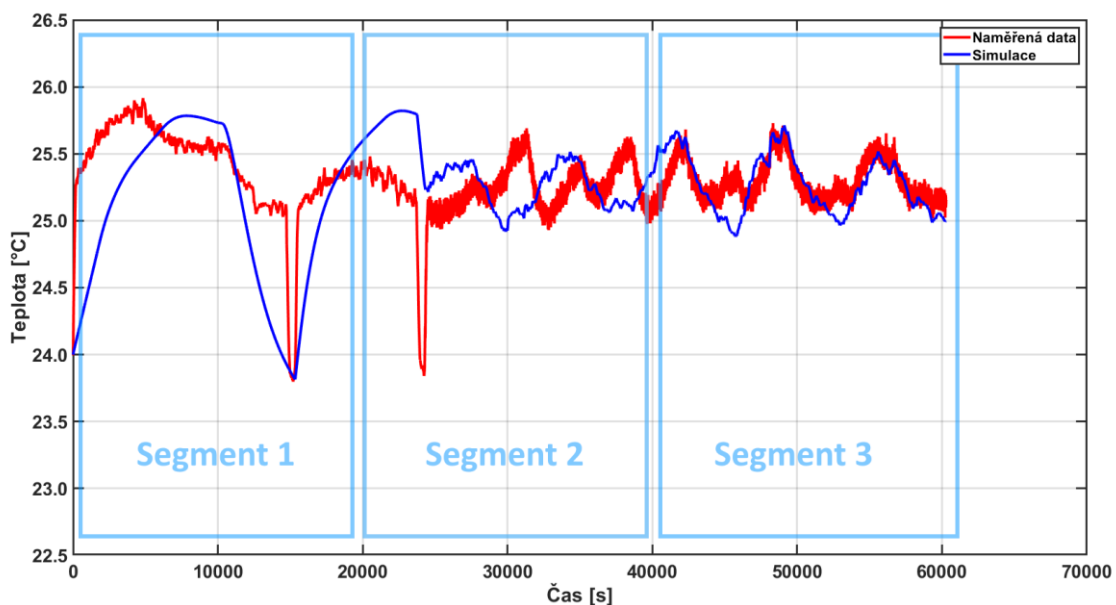


Obrázek 4.20 Průběh proudu testovacího profilu

Proces verifikace a validace dvojčete byl analogický s postupem při tvorbě redukovaného modelu tepla, proto zde budou pouze znázorněny a popsány průběhy charakteristik v grafech. Proudový profil byl naměřen potenciostatem i odsimulován a výsledek byl vyneseno do grafu, na obrázku 4.21. RMSE byla stanovena na $1,78 \cdot 10^{-2}$ V.



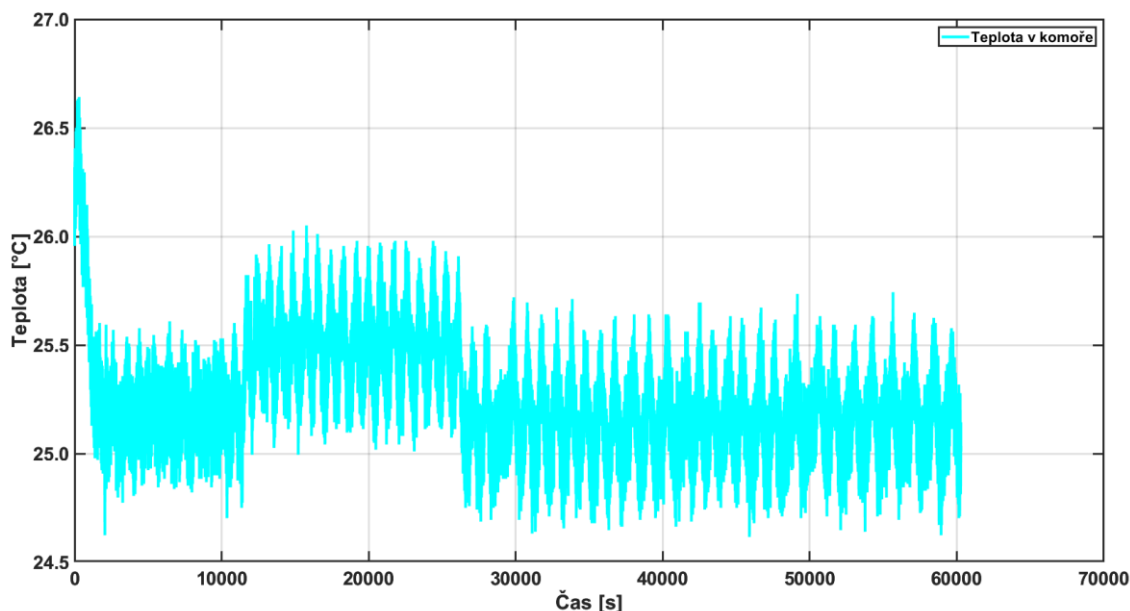
Obrázek 4.21 Porovnání napětí testovacího profilu a naměřených dat



Obrázek 4.22 Porovnání teploty testovacího profilu a naměřených dat

Obrázek 4.22 porovnávající naměřenou a odsimulovanou teplotu je rozdělen do tří segmentů. V prvním segmentu simulovaná křivka odpovídá prudkému nárůstu teploty způsobenému nabíjením a následuje ochlazení při dobití nízkými proudy za konstantního napětí a odezvě, která trvá 5 tisíc sekund. Poskytuje tedy dostatek času

k tomu, aby v simulaci teplota poklesla na úroveň křivky naměřené. Ve druhém segmentu začínajícím vybíjením je však odezva pouze 530 sekund. Teplota naměřená v klimatické komoře klesne na stejné minimum jako v prvním segmentu, zatímco v simulaci teplota klesnout nestihne, jelikož je uvažována konstantní teplota komory. Skutečná teplota komory je vynesena do grafu na obrázku 4.23. Z tohoto důvodu jsou zkreslena i následující data, až po čas 40 tisíc sekund. I přes zjevný nesoulad ve střední části grafu se ve třetím segmentu teplota opět ustálí a křivky jsou shodné. To potvrzuje, že předchozí odchylka byla způsobena teplotním vlivem komory a model je nastaven správně. RMSE byla MATLABem stanovena na 0,23 °C.



Obrázek 4.23 Teplota v klimatické komoře

4.8 Stárnutí akumulátoru

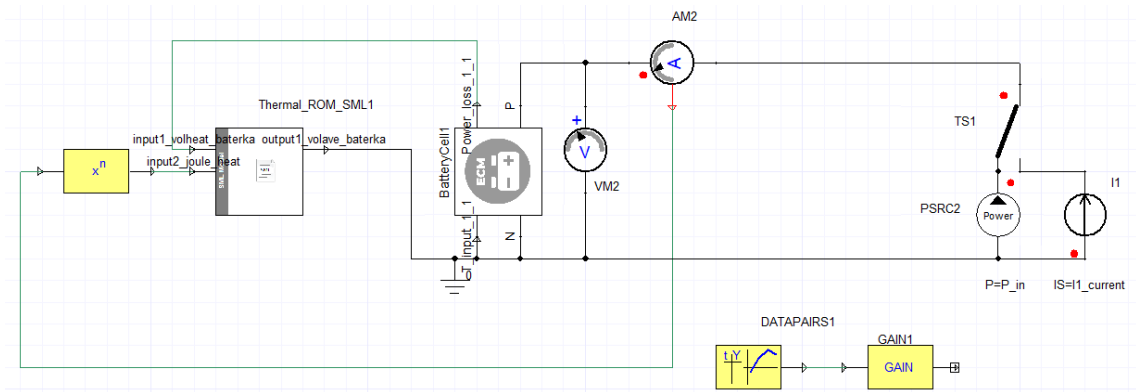
Digitální dvojče disponuje mnoha funkcemi, jednou z nich je predikce stárnutí, které se bude věnovat tato část práce. Mechanismy stárnutí lithium-iontových baterií mohou být ovlivněny různými faktory, včetně provozních podmínek, způsobů používání a materiálů, ze kterých se akumulátor skládá. Zkoumání a pochopení těchto faktorů je nezbytné pro omezení nevhodného provozu a nalezení řešení, jak prodloužit životnost baterie. Projevem stárnutí lithium-iontových akumulátorů je zvýšení vnitřního odporu a ztráta kapacity [46].

Pro potřeby této práce byly poskytnuty soubory z dlouhodobého cyklování akumulátoru. Rozsah těchto souborů byl 600 cyklů vybití a nabití Li-Ion baterie při pokojové teplotě. Jde konkrétně o akumulátor Samsung INR18650-35E s materiálem katody NMC (lithium-nikl-mangan-kobalt) a grafitovou anodou. Měření bylo provedeno za konstantního proudu a konstantního napětí (CCCV) při 0,5C do napětí 4,2 V. Minimální napětí (cut-off) pro vybíjení bylo nastaveno na 2,65 V, parametry akumulátoru jsou zaznamenány v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5 Parametry akumulátoru Samsung INR18650-35E

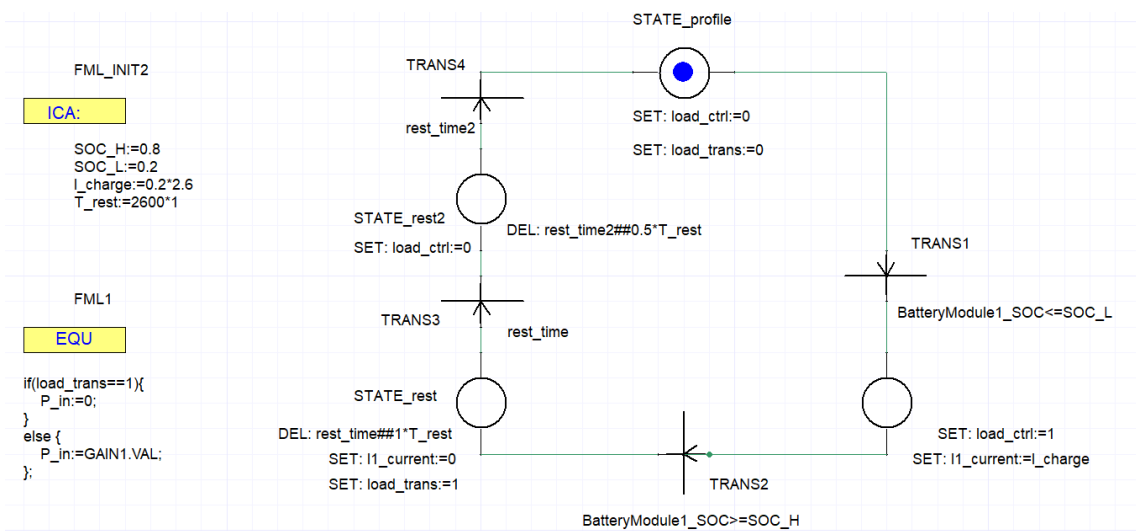
Parametr	Hodnota
Nominální kapacita	3,4 Ah
Nominální napětí	3,6 V
Maximální napětí	4,2 V
Minimální napětí	2,5 V
Maximální proud	8 A
Typ akumulátoru	cylindrický

Pro predikci stárnutí akumulátoru je třeba digitální dvojčce zapojit do obvodu, který je znázorněn na obrázku 4.24. V levé části obrázku jsou bloky pro elektrický model (BatteryCell1) a model tepla (Thermal_ROM_SML1) dohromady tvořící digitální dvojčce. Vpravo je přepínač (TS1), který přepíná mezi proudovým zdrojem (I1) sloužícím k nabíjení a komponentou power source (PSRC2) představující zátěž. Při simulaci vybíjení jsou hodnoty proudu nastaveny vložением profilu do bloku DATAPAIRS1. Parametry pro proudový zdroj jsou definovány až v následujícím schématu.



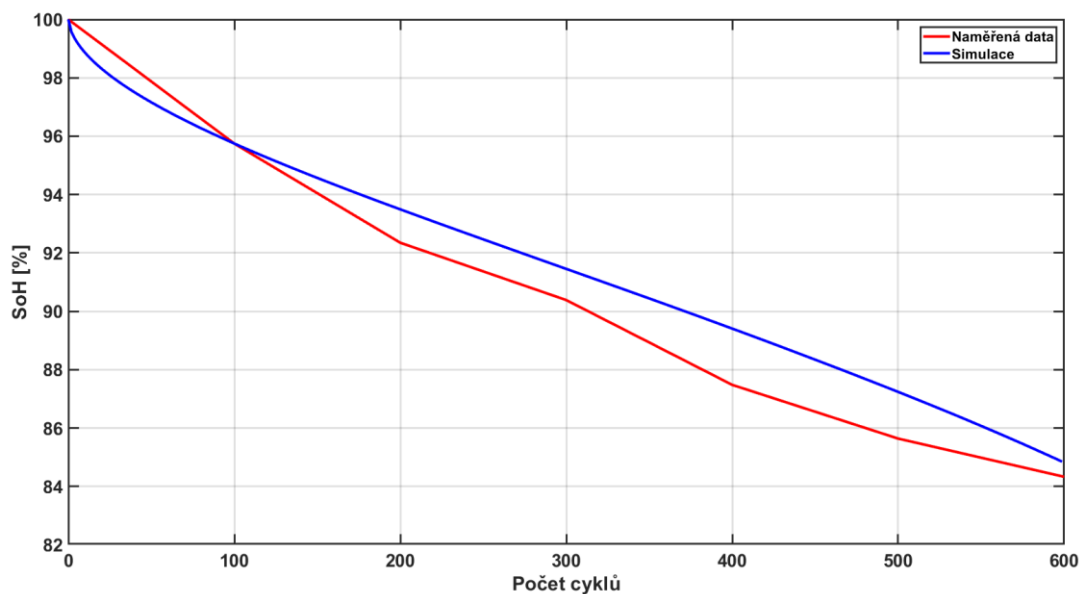
Obrázek 4.24 Schéma zapojení digitálního dvojčete pro predikci stárnutí

Obrázek 4.25 představuje podrobnější nastavení predikce stárnutí. Žlutý blok ICA slouží k nastavení počátečních podmínek. Zadává se zde hodnota maximální a minimální hranice SoC, nabíjecí proud a délka relaxace. Blokem EQU je definováno vybíjení. V pravé části se nachází smyčka, která při spuštění simulace začíná ve výchozím bodě State_profile, kde je jako počáteční podmínka nastaveno zvolené minimum vybití. Poté následuje odezva, nabití akumulátoru po nastavenou maximální hranici SoC, odezva a vybití. Tím je dokončen první cyklus a po odezvě navazuje další. Počet cyklů je dán dobou trvání simulace, čím delší, tím více cyklů stačí proběhnout.



Obrázek 4.25 Schéma nastavení parametrů predikce stárnutí

Po odsimulování prediktivní analýzy s nastavenými hodnotami je možné data zobrazit v grafu jako Aged_capacity, což je pokles kapacity v ampérhodinách nebo jako Aging_Qloss, udávající hodnotu poklesu kapacity v procentech. Data jsou vynesena do grafu na obrázku 4.26 modrou křivkou i s porovnáním s daty naměřenými cyklérem vyjádřenými červenou křivkou. Na ose y je vynesena kondice baterie v procentech (SoH). Z grafu je patrné, že se výsledky shodují. V obou případech došlo k poklesu kapacity přibližně o 15 %. Hodnota RMSE byla stanovena na 1,13 %.



Obrázek 4.26 Porovnání naměřených a predikovaných dat Li-Ion akumulátoru

4.9 Shrnutí praktické části

V praktické části bylo dosaženo funkčního kódu v MATLABu pro extrakci dat a úspěšně vytvořen elektrický model. Na to navázala multifyzikální simulace, která zajistila požadovaný redukováný model tepla. Oba modely byly využity při vytvoření digitálního dvojčete. Následovala verifikace a validace použitím testovacího profilu. Posledním úspěchem byla predikce stárnutí akumulátoru, která dospěla k očekávaným hodnotám. Kvantifikace výsledků je uvedena vždy na konci každé podkapitoly.

5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce v úvodu definovala digitální dvojče, shrnula jeho výhody a jaké jsou jeho aplikace v bateriových systémech Li-Ion, energetice a dalších průmyslových odvětvích. Dále se práce věnovala výhradně softwaru Ansys Twin Builder a jeho využití. Poté byl popsán způsob měření hybridní pulzní charakterizace výkonu (HPPC) na testovaném akumulátoru, zásadní kroky při měření a zpracování získaných dat. Následně bylo představeno náhradní schéma baterie, jeho podstata a fitovací metoda Jiang-Hu. Nakonec bylo objasněno, jakou funkci plní redukovaný model tepla (LTI ROM) a jak jej lze vytvořit pomocí trénovacích dat z programu Ansys Fluent.

Praktickou část zahájil popis přípravy měřicích profilů pro potenciostat. Následně byl rozveden způsob zpracování HPPC dat a vysvětlena extrakce vybijecích pulzů s odezvami pomocí MATLABu. Jejich použitím pak byly stanoveny parametry součástek v náhradním obvodu akumulátoru (ECM), jež byly použity k vytvoření funkčního ECM bloku. Blok byl následně zapojen s ostatními komponenty pro simulaci měřicího profilu ve Twin Builderu. Rozbor simulovaných dat a porovnání s původními měřeními napomohlo optimalizovat předešlé kroky a docílit kvalitního fitu. Pro definování kvality modelu byla jako metrika zvolena odmocnina ze střední kvadratické chyby (RMSE) a pro tyto dva průběhy napětí byla stanovena na $2,44 \cdot 10^{-2}$ V. Pro její výpočet byl použit MATLAB, stejně jako pro mnoho dalších matematických operací v praktické části, jelikož bylo zapotřebí zpracovat relativně rozsáhlé soubory dat.

Navazující kapitola se zabývala tvorbou modelu tepla. Základem tohoto modelu byla 3D geometrie a fyzikální analýza. Geometrie byla vytvořena v softwaru SOLIDWORKS a následně vhodně zasaťována. Pak bylo zapotřebí zjistit vlastnosti měřeného akumulátoru pro popis fyzikálního modelu. Zásadními hodnotami pro přenos tepla byly axiální a radiální složka tepelné vodivosti. Práce pokračovala v programu Ansys Fluent, vložení sítě, nastavením parametrů a odsimulováním průběhu tepla. Model vyžadoval kalibraci a poté bylo možné provést verifikaci a validaci pomocí naměřených dat potenciostatem na fyzickém akumulátoru.

Finalizovaný model byl poté použit pro sběr trénovacích dat, která slouží pro vytvoření redukovaného modelu. Výhodou redukovaných modelů je schopnost

provádět srovnatelně přesné analýzy jako komplexní fyzikální model, avšak během podstatně kratšího času a s nižšími požadavky na výpočetní výkon. Díky tomu je lze nasadit v aplikacích, jako jsou digitální dvojčata, kde je potřeba v reálném čase reagovat na měnící se provozní podmínky. Určení průběhu teploty během měření HPPC dat pomocí multifyzikální simulace trvalo 26,5 hodiny, zatímco výpočet prostřednictvím redukováného modelu proběhl za pouhé tři sekundy.

V návaznosti na předchozí výsledky bylo možné přistoupit k řešení stěžejního úkolu této diplomové práce. Kombinací elektrického modelu a redukováného modelu tepla bylo vytvořeno digitální dvojče. Po potřebných úpravách dvojčete jej bylo ještě nutné propojit s fyzickým akumulátorem. Souběžně byla zajištěna komunikace formou odesílání hodnot napětí, proudu a teploty.

Verifikace a validace byly opět provedeny i pro digitální dvojče. K tomu byl použit testovací profil. Pro zajištění stabilní teploty bylo měření provedeno v klimatické komoře s následným porovnáním výsledků se simulovanými daty. Kvalita modelu byla opět posouzena pomocí metriky RMSE, přesnost hodnot napětí byla stanovena na $1,78 \cdot 10^{-2}$ V a teplota na 0,23 °C.

Důležitými funkcemi digitálního dvojčete jsou what-if analýzy, regulace fyzického systému a predikce stárnutí, kterou jako příklad tato práce na konci uvedla. Pomocí digitálního dvojčete byl predikován pokles kapacity akumulátoru a výsledek byl porovnán s reálnými hodnotami. Ověřená data ukázala, že během 600 cyklů kapacita akumulátoru klesne o 15 %.

Celá práce se věnovala tvorbě digitálního dvojčete, protože poptávka po nich stále roste a v nejbližších letech budou klesat náklady na vývoj a nasazení, čímž poroste i ochota k jejich implementaci. Očekává se, že se v budoucnu digitální dvojčata stanou jedním z hlavních pilířů všech procesů v průmyslu a umožní jejich uživatelům úspěšněji čelit mnoha novým technologickým výzvám.

LITERATURA

- [1] MAŘÍK, Vladimír, 2016. *Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku*. Praha: Management Press. ISBN 978-80-7261-440-0.
- [2] SINGH, Maulshree; FUENMAYOR, Evert; HINCHY, Eoin; QIAO, Yuansong; MURRAY, Niall et al., 2021. Digital Twin: Origin to Future. Online. *Applied System Innovation*. Vol. 4, no. 2, s. 2-3. ISSN 2571-5577. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>. [cit. 2024-02-18].
- [3] GRIEVES, Michael a VICKERS, John, 2016. *Origins of the digital twin concept*. Online. Florida Institute of Technology. S. 1-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. [cit. 2024-02-18].
- [4] SHAFTO, Mike; CONROY, Mike; DOYLE, Rich; GLAESSGEN, Ed; KEMP, Chris et al., 2012. Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap. Online. *NASA Space Technology Roadmaps and Priorities: Restoring NASA's Technological Edge and Paving the Way for a New Era in Space*. Washington, DC: The National Academies Press, s. 1–38. ISBN 978-0-309-25366-6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap. [cit. 2024-02-18].
- [5] YAO, Jun-Feng; YANG, Yong; WANG, Xue-Cheng a ZHANG, Xiao-Peng, 2023. Systematic review of digital twin technology and applications. Online. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*. Vol. 6, no. 1, s. 5-6. ISSN 2524-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>. [cit. 2024-02-23].
- [6] *Digitální dvojče, nová éra průmyslové inovace*, 2023. Online. Svsvfem.cz. Dostupné z: <https://www.svsvfem.cz/digitalni-dvojce-nova-era-prumyslove-inovace>. [cit. 2024-02-24].
- [7] LYU, Chao; XU, Shaochun; LI, Junfu a PECHT, Michael, 2024. Digital twin modeling method for lithium-ion batteries based on data-mechanism fusion driving. Online. *Green Energy and Intelligent Transportation*. Roč. 3, č. 5. ISSN 27731537. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2024.100162>. [cit. 2025-05-14].
- [8] BILANSKY, Juraj; LACKO, Milan; PASTOR, Marek; MARCINEK, Adrian a DUROVSKY, Frantisek, 2023. Improved Digital Twin of Li-Ion Battery Based on Generic MATLAB Model. Online. *Energies*. Roč. 16, č. 3. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en16031194>. [cit. 2025-05-14].

- [9] SEMERARO, Concetta; ALJAGHOUB, Haya; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; ALAMI, Abdul Hai; DASSISTI, Michele et al., 2023. Guidelines for designing a digital twin for Li-ion battery: A reference methodology. Online. *Energy*. Roč. 284. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128699>. [cit. 2025-05-14].
- [10] ISSA, Reda; BADR, Mohamed M.; SHALASH, Omar; OTHMAN, Ali A.; HAMDAN, Eman et al., 2023. A Data-Driven Digital Twin of Electric Vehicle Li-Ion Battery State-of-Charge Estimation Enabled by Driving Behavior Application Programming Interfaces. Online. *Batteries*. Roč. 9, č. 10. ISSN 2313-0105. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/batteries9100521>. [cit. 2025-05-14].
- [11] DEV ANAND, M.; SASIDHARAKURUP, Reshmi; MERCY, T.D; JACOB, Thomson.M. a ATHULA DEVI, S., 2023. Lithium-ion cells for space applications: Aspects of durability. Online. *Advances in Space Research*. Roč. 72, č. 7, s. 2948-2958. ISSN 02731177. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.038>. [cit. 2025-05-14].
- [12] POLAT, Abdurrahman Ozgur; ERDEN, Bekir Cagri; KUL, Seda a NASIROGLU, Fehruleyl, 2024. Light Electric Vehicle Performance with Digital Twin Technology: A Comparison of Motor Types. Online. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Roč. 49, č. 5, s. 7209-7222. ISSN 2193-567X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08668-x>. [cit. 2024-05-08].
- [13] EATY, Naga Durga Krishna Mohan a BAGADE, Priyanka, 2022. Electric Vehicle Battery Management using Digital Twin. Online. *2022 IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*. IEEE, 2022-8-1, s. 1-5. ISBN 978-1-6654-8356-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/COINS54846.2022.9854955>. [cit. 2024-05-08].
- [14] AMBARITA, Evi Elisa; KARLSEN, Anniken; SCIBILIA, Francesco a HASAN, Agus, 2024. Industrial digital twins in offshore wind farms. Online. *Energy Informatics*. Roč. 7, č. 1, s. 5-6. ISSN 2520-8942. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00306-6>. [cit. 2024-04-15].
- [15] *Vibration Technical guide*. Online. IMV CORPORATION. We-are-imv.com. Dostupné z: <https://we-are-imv.com/en/support/library/vibration-measuring/vibration-measuring-04/#sec04>. [cit. 2024-05-08].
- [16] WANG, Hong; OU, Shiqi (Shawn); DAHLHAUG, Ole Gunnar; STORLI, Pål-Tore; SKJELBRED, Hans Ivar et al., 2023. Adaptively Learned Modeling for a Digital Twin of Hydropower Turbines with Application to a Pilot Testing System. Online. *Mathematics*. Roč. 11, č. 18, s. 4-5. ISSN 2227-7390. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/math11184012>. [cit. 2024-04-15].

- [17] ISMAIL, Firas Basim; AL-FAIZ, Hussein; HASINI, Hasril; AL-BAZI, Ammar a KAZEM, Hussein A., 2024. A comprehensive review of the dynamic applications of the digital twin technology across diverse energy sectors. Online. *Energy Strategy Reviews*. Vol. 52, s. 4-13. ISSN 2211467X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101334>. [cit. 2024-04-15].
- [18] NISHANTH, P. K., 2023. *Digital Twin in Oil and Gas: Use Cases and Benefits*. Online. Toobler.com. Dostupné z: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-oil-and-gas>. [cit. 2024-04-15].
- [19] LAND, Jan, 2019. *The Digital Twin in oil and gas: How far have we come?* Online. Dnv.com. Dostupné z: <https://www.dnv.com/article/the-digital-twin-in-oil-and-gas-how-far-have-we-come--212083/>. [cit. 2024-04-15].
- [20] JING, Yufei a WANG, Xiao, 2022. Technical Research on Digital Twin of Oil Rig Winch. Online. *2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*. Čína: IEEE, 2022-4-15, s. 1157-1160. ISBN 978-1-6654-7857-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICSP54964.2022.9778817>. [cit. 2024-04-15].
- [21] ANSYS, 2017. *Creating a Digital Twin with ANSYS*. Online. Youtube.com. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=cxoHx7kitzk>. [cit. 2024-05-08].
- [22] PANG, Toh Yen; PELAEZ RESTREPO, Juan D.; CHENG, Chi-Tsun; YASIN, Alim; LIM, Hailey et al., 2021. Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard. Online. *Applied Sciences*. Roč. 11, č. 3. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11031097>. [cit. 2025-05-14].
- [23] SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz a DASTRES, Roza, 2023. Digital twin for smart manufacturing, A review. Online. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. Roč. 2. ISSN 26673444. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>. [cit. 2025-05-14].
- [24] *Siemens and NVIDIA to Enable Industrial Metaverse*, 2022. Online. Nvidianews.nvidia.com. Dostupné z: <https://nvidianews.nvidia.com/news/siemens-and-nvidia-to-enable-industrial-metaverse>. [cit. 2025-05-16].
- [25] IUMANOVA, Irina F.; MATRENIN, Pavel V. a KHALYASMAA, Alexandra I., 2024. Review of Existing Tools for Software Implementation of Digital Twins in the Power Industry. Online. *Inventions*. Roč. 9, č. 5. ISSN 2411-5134. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/inventions9050101>. [cit. 2025-05-16].

- [26] *Battery Energy Storage System Modeling in Ansys Twin Builder*, 2021. Online. Ansys.com. Dostupné z: <https://www.ansys.com/resource-center/webinar/battery-energy-storage-system-modeling-ansys-twin-builder>. [cit. 2024-04-15].
- [27] *Coupling Twin Builder and Fluent for Battery Thermal Prediction*, 2023. Online. Ansys.com. Dostupné z: <https://www.ansys.com/webinars/coupling-twinbuilder-and-fluent-for-battery-thermal-prediction>. [cit. 2024-04-15].
- [28] *Ansys Twin Builder Simulation-Based & Hybrid Analytics*. Online. Ansys.com. Dostupné z: <https://www.ansys.com/content/dam/product/digital-twin/twin-builder/ansys-twin-builder-technical-datasheet.pdf>. [cit. 2024-04-16].
- [29] LAZANAS, Alexandros Ch. a PRODRAMIDIS, Mamas I., 2023. Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial. Online. *ACS Measurement Science Au*. 2023-06-21, roč. 3, č. 3, s. 162-193. ISSN 2694-250X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>. [cit. 2024-05-08].
- [30] KIM, Jaeyoung; PARK, Sangbin; HWANG, Sunhyun a YOON, Won-Sub, 2022. Principles and Applications of Galvanostatic Intermittent Titration Technique for Lithium-ion Batteries. Online. *Journal of Electrochemical Science and Technology*. Roč. 13, č. 1, s. 19-31. ISSN 2093-8551. Dostupné z: <https://doi.org/10.33961/jecst.2021.00836>. [cit. 2024-05-08].
- [31] DUNCAN, Theresa, 2021. *Building Better Batteries: Characterize Battery Parameters for Simulation*. Online. Ansys.com. Dostupné z: <https://www.ansys.com/blog/building-better-batteries>. [cit. 2024-04-15].
- [32] JAGDALE, Saumitra, 2023. *Modeling Li-Ion Batteries with Equivalent Circuit Technology*. Online. Powerelectronicsnews.com. Dostupné z: <https://www.powerelectronicsnews.com/modeling-li-ion-batteries-with-equivalent-circuit-technology/>. [cit. 2024-04-15].
- [33] BIAŁOŃ, Tadeusz; NIESTRÓJ, Roman; SKARKA, Wojciech a KORSKI, Wojciech, 2023. HPPC Test Methodology Using LFP Battery Cell Identification Tests as an Example. Online. *Energies*. Roč. 16, č. 17, s. 4-5. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en16176239>. [cit. 2024-04-15].
- [34] JIANG, Shugang. *A Parameter Identification Method for a Battery Equivalent Circuit Model*. Online. S. 1-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1367>. [cit. 2024-05-08].
- [35] OZEN ENGINEERING, INC, 2023. *How to Create Thermal Models of Automotive Batteries in Ansys Fluent*. Online. Youtube.com. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_69zo40WZ3k&t=692s. [cit. 2024-05-08].
- [36] HU, Xiao; COLLINS, Lewis; STANTON, Scott a JIANG, Shugang. *A Model Parameter Identification Method for Battery Applications*. Online. S. 1-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1529>. [cit. 2024-05-08].

- [37] ZHU, Xiaoyang a JI, Yangjian, 2023. A reduced order model based on adaptive proper orthogonal decomposition incorporated with modal coefficient learning for digital twin in process industry. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. Roč. 102, s. 780-794. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.061>. [cit. 2025-05-14].
- [38] HU, Xiao; CHAUDHARI, Lalit; LIN, Shaohua; STANTON, Scott; ASGARI, Saeed et al., 2012. A state space thermal model for HEV/EV battery using vector fitting. Online. *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, s. 1-8. ISBN 978-1-4673-1408-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2012.6243450>. [cit. 2024-05-08].
- [39] ANSYS LEARNING, 2022. *Battery Thermal Modeling Using Ansys Fluent - Part 1*. Online. Youtube.com. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=n-gj9w0XfW8>. [cit. 2024-05-08].
- [40] ANSYS LEARNING, 2022. *Battery Thermal Modeling Using Ansys Twinbuilder - Part 2*. Online. Youtube.com. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=V3bbJqAXptc>. [cit. 2024-05-08].
- [41] DARABA, Dinu; POP, Florina a DARABA, Catalin, 2024. Digital Twin Used in Real-Time Monitoring of Operations Performed on CNC Technological Equipment. Online. *Applied Sciences*. Roč. 14, č. 22. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app142210088>. [cit. 2025-05-14].
- [42] ZHOU, Cheng; CHEN, Danyang; MARTINEZ-JULIA, Pedro a MA, Qiufang, 2023. *Data Collection Requirements and Technologies for Digital Twin Network*. Online. Ietf.org. Dostupné z: <https://www.ietf.org/archive/id/draft-zcz-nmrg-digitaltwin-data-collection-02.html#section-abstract-1>.
- [43] DUAN, Xiting; JIANG, Wenjuan; ZOU, Youlan; LEI, Weixin a MA, Zengsheng, 2018. A coupled electrochemical–thermal–mechanical model for spiral-wound Li-ion batteries. Online. *Journal of Materials Science*. Roč. 53, č. 15, s. 10987-11001. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2365-6>. [cit. 2025-05-14].
- [44] ABRAHAM, K. M., 2023. How Safe Are Li-ion Batteries? Online. *Journal of The Electrochemical Society*. 2023-11-10, roč. 170, č. 11. ISSN 0013-4651. Dostupné z: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad066b>. [cit. 2025-05-14].
- [45] SHEPARD, Jeff, 2021. *18650, 21700, 30700, 4680 and other Li-ions – what’s the difference?* Online. Dostupné z: batterypowertips.com/18650-21700-30700-4680-and-other-li-ions-whats-the-difference-faq/. [cit. 2025-05-16].
- [46] LI, Yaqi; GUO, Wendi; STROE, Daniel-Ioan; ZHAO, Hongbo; KJÆR KRISTENSEN, Peter et al., 2024. Evolution of aging mechanisms and performance degradation of lithium-ion battery from moderate to severe capacity loss scenarios. Online. *Chemical Engineering Journal*. Roč. 498. ISSN 13858947. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155588>. [cit. 2025-05-14].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratky:

A/D	Analogově-digitální
CCCV	Constant Current Constant Voltage
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHT	Conjugate Heat Transfer
CNC	Computer Numerical Control
CV	Cyklická voltametrie
DVA	Analýza derivace napětí
ECM	Equivalent Circuit Model
EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
EQU	Equation
FFT	Fast Fourier Transform
FV	Fotovoltaický
GITT	Galvanostatická přerušovaná titrační technika
HPPC	Hybridní pulzní charakterizace výkonu
ICA	Analýza přírůstků kapacity
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
LFA	Laser Flash Analysis
Li-Ion	Lithium-iontový
LTI	Linear Time Invariant
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMC	Nikl-mangan-kobalt
PET	Polyethylentereftalát
PID	Proportional Integral Derivative
PVC	Polyvinylchlorid
RC	Resistor–Capacitor
RMSE	Root Mean Square Error
ROM	Reduced Order Model
SoC	State of Charge
SoH	State of Health

Symbols:

SoC	úroveň nabití baterie	(%)
Q	uložený náboj v baterii	(C)
Q_n	nominální kapacita	(C)
U_n	napětí naprázdno	(V)
R_0	vnitřní odpor	(Ω)
i	proud	(A)
U_t	napětí na kontaktech	(V)
C	kapacita	(F)
t	čas	(s)
T	čas v části pulsu	(s)
T_0	čas v začátku pulsu	(s)
T_0^-	čas těsně před začátkem pulsu	(s)
T_0^+	čas bezprostředně po začátku pulsu	(s)
τ	časová konstanta	(s)
I	proud	(A)
n	počet bodů měření	(-)
y_i	měřená hodnota při i -tém vzorku	(-)
\hat{y}_i	simulovaná hodnota při i -tém vzorku	(-)
δ	tloušťka vrstvy	(m)
ρ	hustota	(kg/m^3)
C_p	tepelná kapacita za konstantního tlaku	($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
λ	součinitel tepelné vodivosti	($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
σ	měrná elektrická vodivost	(S/m)
σ_p	měrná elektrická vodivost kladného kontaktu	(S/m)
σ_n	měrná elektrická vodivost záporného kontaktu	(S/m)
δ	tloušťka vrstvy materiálu	(m)
x	fyzikální veličina aktivního materiálu	(-)
x_{eff}	výsledná fyzikální veličina aktivního materiálu	(-)

Příloha A - Elektronická příloha

Elektronická příloha obsahuje soubor s HPPC daty, který byl použit pro vytvoření elektrického modelu v softwaru Ansys Twin Builder. Dále příloha obsahuje MATLAB skript, který byl použit k extrakci HPPC dat z dokumentu s naměřenými hodnotami.