ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Identifikace matematického modelu trakční baterie

Bc. Petr Goran **2020**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Petr GORAN**
Osobní číslo:	**E18N0036P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Téma práce:	**Identifikace matematického modelu trakční baterie**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Změřte charakteristiky naprázdno (klidové napětí po ustálení) daného lithiového článku v závislosti na velikosti odebíraného proudu a teplotě.
2. Sestavte matematický model článku založený na sério-paralelní kombinaci R a C a z naměřených dat proveďte identifikaci parametrů modelu.
3. Proveďte ověření identifikace porovnáním výstupů z modelu a měřením zatíženého článku.
4. Sestavte zjednodušený matematický model elektrického osobního automobilu zahrnující jízdní odpory, základní účinnosti pohonného řetězce a identifikovaný model trakční baterie.
5. Porovnejte pomocí série simulací simulovaný dojezd elektromobilu na jízdních cyklech NEDC a WLTP, a to při zvolené teplotě odpovídající letnímu a zimnímu období.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. T. Sarkurt, M. Ceylan and A. Balkç, „A hybrid battery model and state of health estimation method for lithium-ion batteries," 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Cavtat, 2014, pp. 1349-1356.
2. B. O. Varga, T. Mariasu, D. Moldovanu, C. Iclodean: Electric and Plug-In Hybrid Vehicles – Advanced Simulation Technologies, Springer 2015, ISBN 978-3-319-18638-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Komrska, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předkládaná práce je zaměřena na identifikaci jednoduchého modelu lithiové trakční baterie. Model byl stanoven na základě série měření bateriového článku. Měření zohledňovala zejména změny vybíjecího proudu a teploty. Na základě série provedených měření byl identifikován Théveninův model. Na sestaveném modelu elektrického vozu byly provedeny simulace spotřeb a dojezdů s modelem bateriového článku v závislosti na teplotě a metodice NEDC a WLTP.

Klíčová slova

Trakční lithiové baterie, elektrická vozidla, Matlab, Simulink, matematické modelování, simulace, NEDC, WLTP, SOC

Abstract

The presented thesis is focused on the identification of a simple mathematic model of a lithium traction battery. The model was determined based on a series of battery cell measurements. The measurements mainly took into account changes in the discharge current and temperature. Based on a series of measurements, Thevenin's model was identified. On the assembled model of the electric vehicle, simulations of consumption and range were performed with the model of the battery cell depending on the temperature and the NEDC and WLTP test cycles.

Key words

Traction lithium battery, electric vehicle, Matlab, Simulink, mathematic model, simulation, NEDC, WLTP, SOC

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 18.6.2020 Bc. Petr Goran

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Komrskovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **9**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **10**

1 MODELOVÁNÍ LITHIOVÝCH BATERIÍ **11**

1.1 KAPACITA BATERIE 12
1.2 STAV NABITÍ BATERIE (SOC) 12
1.3 STAV DEGRADACE BATERIE (SOH) 12
1.4 VNITŘNÍ ODPOR BATERIE 13
1.5 ZÁKLADNÍ MODELY BATERIÍ 13
1.5.1 Elektrochemický model *13*
1.5.2 Statistický a pravděpodobnostní model *13*
1.5.3 Analytický model *14*
1.5.4 Tepelný model *15*
1.5.5 Elektrický model *15*

2 IDENTIFIKACE MODELU BATERIE **21**

2.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ LITHIOVÉHO ČLÁNKU A SBĚR DAT 21
2.1.1 Použité přístroje *21*
2.1.2 Metodika měření *22*
2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ANALÝZA VLASTNOSTÍ ČLÁNKU 23
2.2.1 Vliv teploty *23*
2.2.2 Vliv vybíjecího proudu *24*
2.2.3 Vybíjecí charakteristiky s pulsním vybíjením *25*
2.3 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MODELU 27
2.3.1 Identifikace OCV *27*
2.3.2 Identifikace odporu R_0 ..... *28*
2.3.3 Identifikace odporu RC článku *31*
2.3.4 Identifikace proměnných parametrů RC článku *32*
2.4 VERIFIKACE MODELU BATERIE POMOCÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ 34

3 OVĚŘENÍ MODELU BATERIE NA MODELU ELEKTRICKÉHO VOZU **41**

3.1 MODEL ELEKTRICKÉHO VOZIDLA 41
3.1.1 Vybraný vůz *41*
3.1.2 Pohyb simulovaného vozu *41*
3.1.3 Identifikace jízdních odporů *42*
3.1.4 Účinnost pohonného ústrojí *43*
3.1.5 Schéma modelu *44*
3.2 METODIKA TESTOVÁNÍ DOJEZDU ELEKTRICKÝCH VOZIDEL 45
3.2.1 NEDC cyklus *45*
3.2.2 WLTP cyklus *46*
3.3 SPOTŘEBA SYSTÉMŮ VOZIDLA 47
3.3.1 Topení a klimatizace *47*
3.3.2 Spotřeba ostatních systémů *48*
3.3.3 Počet článků v baterii *48*
3.4 POROVNÁNÍ DOJEZDU 49
3.4.1 Dojezd při cyklu NEDC *49*
3.4.2 Dojezd při cyklu WLTP *52*
3.4.3 Porovnání NEDC a WLTP *56*

ZÁVĚR **57**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ **58**

Úvod

V dnešní době se odvětví elektromobility velmi rozrůstá a elektrické vozy jsou mnohými považovány jako nástupci konvenčních vozidel. Přináší několik velkých benefitů jakými jsou vysoká spolehlivost, nulové lokální emise a nezávislost provozu na fosilních palivech. Oproti tomu zde nastává problém se značným nárůstem pořizovací ceny. Nejdražším prvkem elektrického vozu je baterie a současně ji lze považovat za nejslabší článek vozu, jelikož hustota energie v ní uchovaná je nižší než v palivu, což značně omezuje dojezd elektrických vozidel. Odhadování dojezdu velmi závisí na přesném modelování baterie. Problematické je identifikovat dostupné množství energie, jelikož se nelze pouze spoléhat na napětí článku, které je ovlivněno teplotou, odebíraným proudem nebo dobou zotavení po zatížení.

Cílem této práce je identifikace matematického modelu lithiové baterie, který zohledňuje dominantní vlivy, jakými jsou teplota, proudové zatížení nebo doba zotavení po zatížení. Identifikace je provedena na základě série provedených měření lithiových článků, kdy je sledován především vliv teploty a zatížení. Výsledný matematický model lze použít pro matematické modelování všech bateriových pohonů včetně hybridních elektrických vozidel. Model lze také aplikovat jako součást battery managementu (BMS) lithiových baterií pro odhadování stavu nabití (SOC) a dojezdu zejména s ohledem na aktuální teplotu a zatížení. Ověření identifikovaného modelu je provedeno ve dvou krocích. Prvním je porovnání výsledků s naměřenými průběhy napětí. Dalším je vytvoření dostatečně přesného modelu vybraného elektrického vozu Nissan Leaf reprezentující účinnosti pohonného ústrojí s jeho jízdními odpory čímž je ověřen dojezd vozidla s ohledem na teplotu a metodiku (NEDC a WLTP).

Seznam zkratek

SOC ..... State of charge

SOH ..... State of health

BMS..... Battery manegement system

OCV..... Open circuit voltage

FTP ..... Federal test procedure

WLTP ..... World light test procedure

NEDC ..... New european driving cycle

Seznam symbolů

Q_C..... Využitelná kapacita baterie

Q_d ..... Odebraný náboj z baterie

Q_{cav}..... Maximální dostupná kapacita baterie

I..... Vybíjecí proud

R_0 ..... Vnitřní odpor baterie

R_p ..... Odpor mezi elektrodami a elektrolytem

C..... Kapacita mezi elektrodami a elektrolytem

U_{OCV}..... Napětí baterie naprázdno

U_{out}..... Napětí baterie při zatížení

U_{p1}..... Napětí v začátku působení proudu

U_{p2}..... Konečná hodnota napěťového skoku

H ..... Čas vybití při nominální hodnotě proudu

k ..... Peukertova konstanta

ΔT ..... Teplotní korekce

F ..... Síla působící na vozidlo

m ..... Hmotnost vozidla

a ..... Zrychlení vozidla

v ..... Rychlost vozidla

F_v..... Valivý odpor

C_{rrr}..... Koeficient valivého odporu

F_0..... Aerodynamický odpor

C_x ..... Součinitel vzdušného odporu

1 Modelování lithiových baterií

Jednou z největších výzev v dnešní elektrifikaci dopravy je ukládání elektrické energie v požadovaném okamžiku a množství. Akumulátory elektrických a hybridních vozidel jsou relativně drahé ve srovnání s cenou celého automobilu, a to kvůli vysokému počtu článků s obsahem vzácných kovů, jakým je především lithium. Životní cyklus těchto baterií je proto velmi důležitý z hlediska nákladů pro uživatele. Dnes jsou nejvyužívanější lithiové baterie, které vynikají velkou hustotou energie ve srovnání s tradičními články na bázi olova nebo niklu.

Lithium je jeden z nejlehčích známých kovů, který má velmi dobré elektrochemické vlastnosti a umožňuje dosáhnout velkou hustou energie. První komerční použití těchto typů se datuje do počátku 70. let, i přesto, že pokusy s lithiem byly prováděny již na počátku dvacátého století. Zpočátku byly využívány pouze nenabíjecí, a to z důvodu problémů při nabíjení vzhledem k nestabilitě článků pouze z lithia. Proto byl později vývoj zaměřen na typy kombinující různé anodové nemetalické materiály navzdory tomu, že nedosahují takových parametrů jako metalické. Tyto články jsou nazývány Lithium-iontové. Hustota energie je i přesto dvojnásobná oproti dříve používaným Ni-Cd. Typické nominální napětí článků je 3,6– 3,7 V, tedy výrazně vyšší než u klasických olověných baterií (2 V) [1]. Výhodou je také nízké samovybíjení, absence paměťového efektu a nízká údržba. I přes všechny benefity je výsledná lithiová trakční baterie stále poměrně citlivým systémem, vyžadující mimo jiné podrobný monitoring a ochranu, zohledňující zejména přetížení, přehřátí, přebíjení, úplné vybití nebo rozbalancování jednotlivých článků.

Elektrochemická podstata baterií má za následek velmi nelineární chování. To je závislé na mnoha faktorech jako je stav nabití, počet provedených cyklů, teplota, stárnutí, profil zatěžování, a i způsob nabíjení. Je také potřeba zohlednit počet článků a způsob jejich spojení. Moderní trakční baterie obsahují desítky až stovky sériově spojených článků a jednotky až desítky paralelních větví což způsobuje výraznější nelineární chování s jevy vyskytující se pouze v bateriích, a nikoliv v jednotlivých článcích.

Existuje mnoho přístupů a technik pro modelování baterií, z nichž každý je vhodnější pro některé specifické potřeby a zdůrazňující určité efekty. Jak již bylo zmíněno výše, je mnoho faktorů, jakými jsou teplota, rychlost vybíjecího proudu, stáří atd., které ovlivňují

chování baterií. Podle finální aplikace jsou stanoveny požadavky na míru přesnosti, které jsou zohledněny pro výsledný model. Zároveň však přesnost je vždy vyvážena složitostí modelu a jeho identifikací, a také výpočetní náročností, pokud je implementován v systému BMS.

1.1 Kapacita baterie

Kapacita baterie nám udává množství uloženého elektrického náboje a nejčastěji se uvádí v ampérhodinách (Ah), vyjadřující vztah velikosti odebíraného proudu a času. Výrobcem je často udávána kapacita jmenovitá, která značí vybíjení při určitých podmínkách, jakými jsou teplota, velikost vybíjecího proudu či stáří samotného článku. Ty mají na využitelnou kapacitu velký vliv. Proto je důležité znát skutečnou kapacitu za podmínek, kdy bude baterie využívána [2].

1.2 Stav nabití baterie (SOC)

Tento parametr udává poměr aktuálního množství dostupného náboje a nejvyšší dostupné využitelné kapacity při plném nabití, tedy

$$SOC = \frac{Q_C - Q_d}{Q_C} * 100\ [\%], \qquad (1.1)$$

kde Q_C je maximální využitelná kapacita a Q_d je odebraný náboj [3].

1.3 Stav degradace baterie (SOH)

Baterie postupně degraduje a využitelná kapacita s časem a používáním klesá, proto je definován maximální dostupný náboj vzhledem k původní hodnotě, který se nazývá stav degradace baterie, definován jako

$$SOH = \frac{Q_{cav}}{Q_C} * 100\ [\%], \qquad (1.2)$$

kde Q_{cav} je maximální dostupná kapacita a Q_C je původní hodnota. Maximální hodnota je dosažena typicky ihned po výrobě.

1.4 Vnitřní odpor baterie

Vnitřní odpor baterie je možné vnímat podobně jako vnitřní odpor zdroje, který má za následek pokles napětí při zatížení určitým proudem, tedy

$$R_0 = \frac{U_{OCV} - U_{out}}{I}\ [\Omega], \qquad (1.3)$$

kde U_{OCV} je napětí článku naprázdno a U_{out} je napětí při zatížení proudem I. Tato veličina je také velmi závislá na stavu nabití, degradace a teplotě baterie. Je to jeden z klíčových parametrů pro získání odpovídajícího modelu akumulátoru.

1.5 Základní modely baterií

1.5.1 Elektrochemický model

Elektrochemické modely jsou založeny na interních chemických reakcích. Je zde podrobně popsána elektrochemická dynamika a z tohoto důvodu jsou tyto modely nejpřesnější. Nevýhodou je jejich složitost a obtížné konfigurování. Model navržený pro lithium-iontové baterie se skládá ze šesti párů nelineárních diferenciálních rovnic. Řešením těchto rovnic získáme hodnoty napětí a proudu v závislosti na čase, přičemž se bere v úvahu hustota soli elektrolytu, reakční rychlost a proud. Simulace mohou ale trvat několik hodin až dní, čímž nejsou úplně vhodné pro aplikace v reálném čase, jakými jsou např. systémy BMS elektrovozů [4].

1.5.2 Statistický a pravděpodobnostní model

Statistické modely jsou založeny na získávaní informací ze vzorových datových souborů pro konfiguraci parametrů modelu namísto jejich odvození z fyzikálních vlastností. Tyto modely jsou rychlé a kompaktní, nejsou však tak přesné jako fyzikální modely.

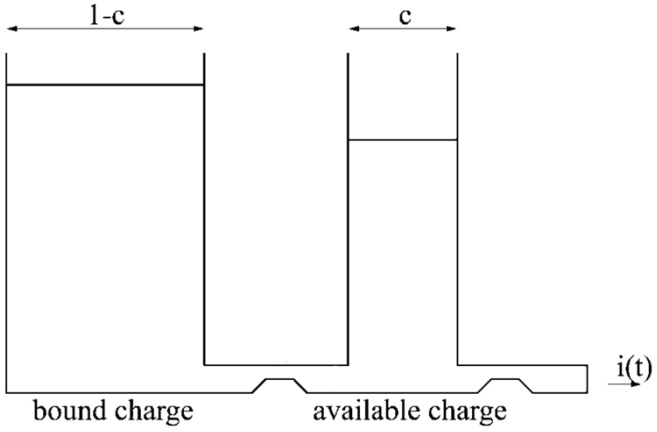
Pravděpodobnostní modely jsou založeny na podobném zisku dat jako statistické. Výsledky, které jsou definovány na pravděpodobnostních procesech jsou přesnější, ale základy modelu jsou komplikované a závisí na pokročilých simulačních technikách [4].

1.5.3 Analytický model

V tomto případu jsou kombinovány elektrochemické, statistické a pravděpodobnostní. Jsou zde prováděny experimenty ke snížení počtu parametrů zjednodušeného elektrochemického modelu.

Jednou z možných metod je tzv. Peukertova rovnice, která zobrazuje závislost kapacity baterie na rychlosti její vybití. I přes možné modifikace, které do ní mohou být aplikovány jako je například integrace proudu, tak z důvodu nelineárních účinků, jakým je především efekt zotavení baterie může v praxi obsahovat velké chyby [15].

Dalším možným analytickým modelem je kinetický, kdy lze baterii modelovat jako kombinaci dvou spojených vodních nádrží připomínajících nabití baterie. To je vidět na obrázku 1.1 [5].



Obr. 1.1 Kinetický model [5]

První nádrž obsahuje volné náboje, které jsou schopny dodávat proud přímo do zátěže, zatímco druhá s vázanými náboji dodává pouze elektrony do nádrže s volnými. Náboj se mezi nimi dostává přes ventil s pevnou vodivostí. Když je k baterii připojena zátěž, dostupné nabití (volné náboje) se zmenší a výškový rozdíl se mezi nádržemi zvětší. Po odstranění zátěže putuje náboj do nádrže s volnými. Tímto způsobem je zohledněn efekt zotavení stejně tak i to, že pro vyšší vybíjecí proud je méně času na dodání volných nábojů a tím pádem i

menší celková zužitkovaná kapacita. Baterie je vybitá, pokud není k dispozici žádný volný náboj [5].

1.5.4 Tepelný model

Teplota významným faktorem ovlivňuje výkonost a životnost baterie. Některé experimentální výsledky ukazují, že každé zvýšení teploty o 10 °C nad maximální dovolenou snižuje životnost až o polovinu. To zdůrazňuje důležitost tepelných modelů především u baterií s velkým počtem článků, kde může mezi nimi docházet k velkým teplotním rozdílům. Například články umístěné ve středu baterií mají vyšší teplotu než ty, které jsou umístěné na okrajích a mají lepší ventilaci. Z tohoto důvodu kolísání teploty se mění vlastnosti článků a tím pádem i celé baterie, které přispívají k celkové snížení životnosti.

Teplota neovlivňuje jen výkonnost a životnost, ale má spojitost i s bezpečností. Bezpečnostní problémy lithiových baterií se často odvíjejí od teploty. Ta musí být tedy zohledněna v celkovém modelu správy baterií.

Tyto modely jsou řešeny pomocí simulačních programů jako například ADVISOR, který byl vyvinut Národní laboratoří pro obnovitelné zdroje a je k dispozici jako knihovna v prostředí Matlab/Simulink [4].

1.5.5 Elektrický model

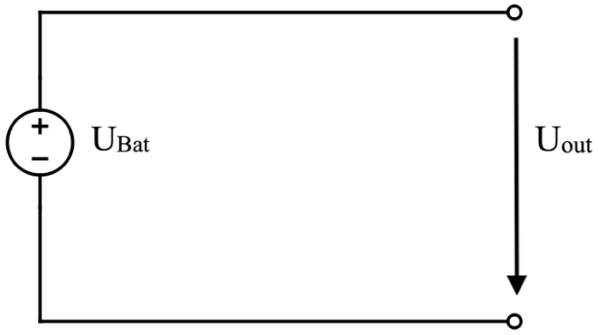
Elektrické modely používají k reprezentaci chování baterie náhradní zapojení s elektrickými prvky. Jsou výhodné, v případě modelování výstupního napětí a odhadu SOC. Snadno se s nimi pracuje, jsou intuitivní a je možné jednoduše použít ve spojení se dalšími elektrickými obvody a dále s nimi pracovat.

Baterie mohou být modelovány mnoha způsoby. Nejjednodušší modely používají regulovaný napěťový zdroj, případně kondenzátor s velkou kapacitou. Přidáváním dalších komponent pak lze simulovat další efekty. Vybíjecí proces může být například modelován regulovaným zdrojem napětí v sérii s kondenzátorem s opačnou polaritou. Tyto modely jsou ale velmi zjednodušené a lze je omezeně použít pouze v určitých případech. Navíc často platí jen v omezených podmínkách jako je ustálený stav nebo během krátkého časového

úseku. Pro dynamické nebo přechodné stavy jako je pulsní vybíjení jsou potřeba složitější modely. Obecně lze modely rozdělit do několika kategorií, jak je popsáno níže

1.5.5.1 Ideální model

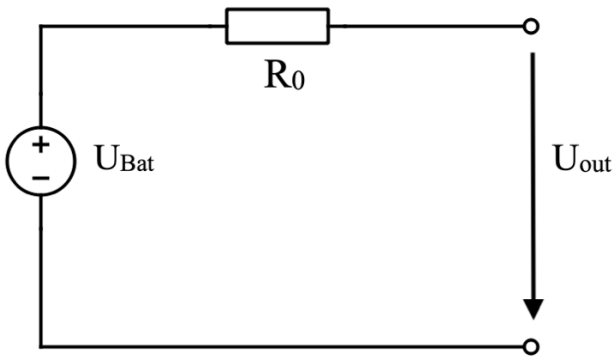
Tento model přehlíží vnitřní parametry baterie a je velmi jednoduchý. Jak je možné vidět na obrázku 1.2, skládá se pouze z napěťového zdroje, kdy U_{Bat} je rovno U_{out}. Napětí baterie se v tomto modelu mění se stavem nabití. Není respektován vnitřní odpor, pokles napětí ani jeho zotavení [4].



Obr. 1.2 Ideální model baterie

1.5.5.2 Lineární model

Četně používané modely jsou modely lineární. Na obrázku 1.3 lze vidět náhradní schéma, které na rozdíl od ideálního modelu obsahuje odpor R_0 pro reprezentaci vnitřního odporu baterie [4].



Obr. 1.3 Lineární model baterie

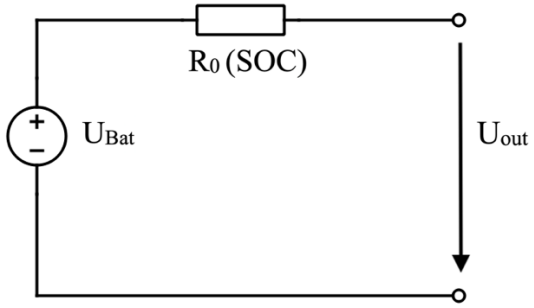
Navzdory širokému použití tyto modely nezohledňují proměnný vnitřní odpor při změně stavu nabití SOC a koncentraci elektrolytu.

Pro výstupní napětí tohoto modelu platí:

$$U_{out} = U_{Bat} - R_0\, I. \qquad (1.4)$$

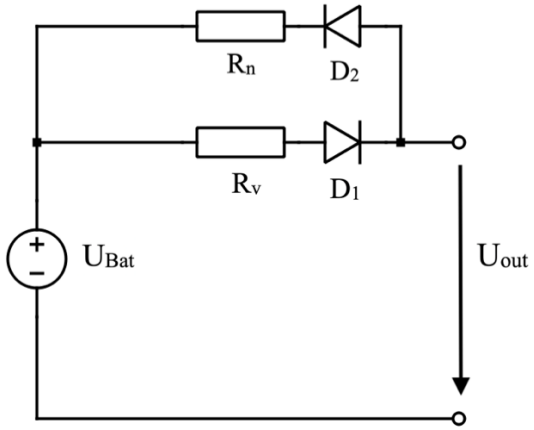
Jak již bylo zmíněno dříve, v reálné baterii je vnitřní odpor velmi závislý na několika parametrech, a proto je vhodné tento model využívat ve středu dostupné kapacity, kde teplota, a tím pádem i vnitřní odpor, jsou téměř konstantní.

Pro jiné případy je možné použít přesnější model, kde R_0 není konstantní, ale závislý na stavu nabití SOC [6].



Obr. 1.4 Lineární model baterie s R_0 závislým na SOC

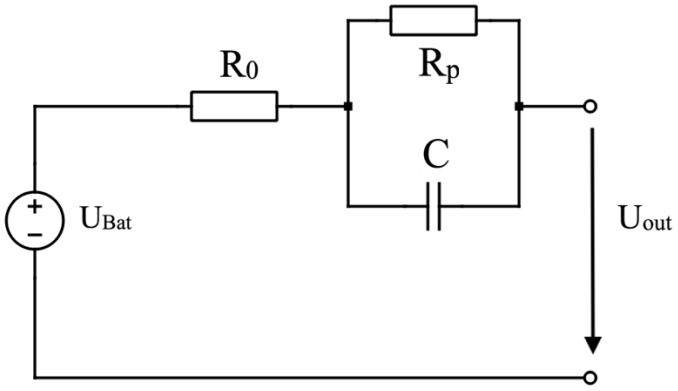
Jelikož je vnitřní odpor rozdílný i při nabíjení a vybíjení, je možné tento model rozšířit o další odpor spolu s diodami, které zajistí průchod proudu vždy jen jedním z nich, jak je vidět na obrázku 1.5 [6].



Obr. 1.5 Lineární model baterie s přidaným odporem pro nabíjení

1.5.5.3 Théveninův model

Žádný z předchozích modelů není platný pro simulace v přechodných dějích. Jako jeden z možných způsobů pro tyto případy je využití Théveninova modelu. Ten oproti již výše zmiňovaným přidává do obvodu jeden nebo více paralelních spojení RC článků, které jsou určeny pro modelování přechodného děje. Schéma modelu prvního řádu je vidět na obrázku 1.6 [4].

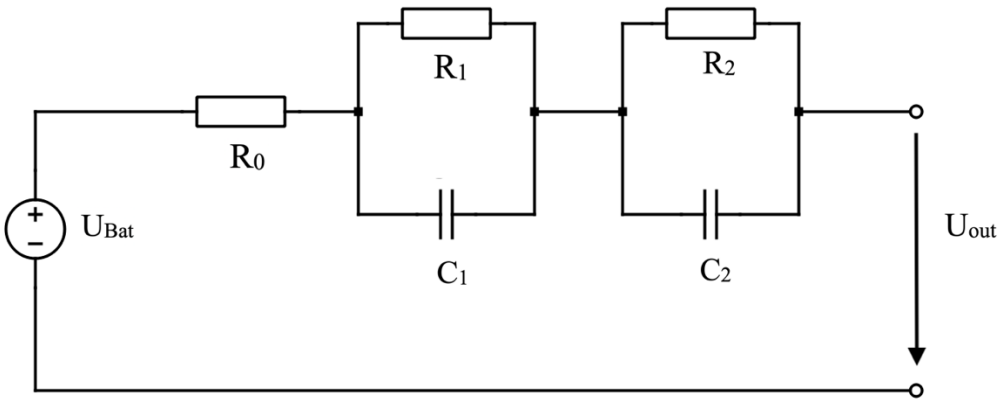


Obr. 1.6 Théveninův model prvního řádu

Jedná se o nejjednodušší Théveninův model. R_0 zde způsobuje hlavní úbytek napětí, R_p vyjadřuje odpor a C_1 kapacitu mezi elektrodami a elektrolytem Z obrázku je vidět, že výstupní napětí je nyní sníženo nejen o úbytek na R_0, ale také o napětí RC článku, tedy U_C:

$$U_{out} = U_{Bat} - R_0\, I - U_C. \qquad (1.5)$$

Další variantou Théveninova modelu je model tzv. druhého řádu se dvěma RC články v sérii. To přináší výhodu přesnějšího modelování komplikovaných průběhů napětí s kombinací časových konstant při delším zatížení nebo při procesu zotavení.



Obr. 1.7 Théveninův model druhého řádu

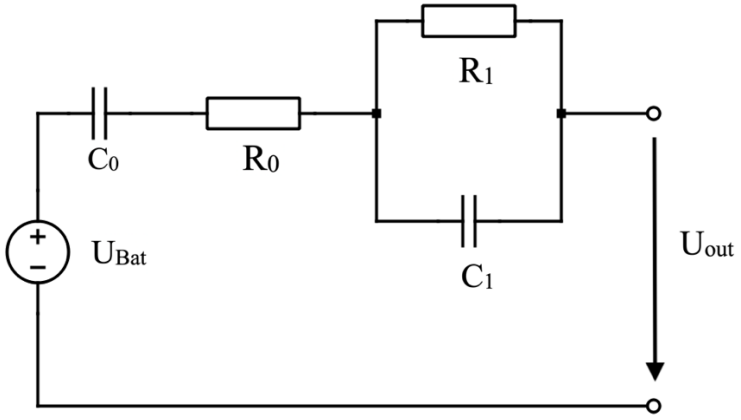
Z uvedeného obrázku 1.7 získáme pro výstupní napětí následující rovnici:

$$Uout = U_{BAT} - R_0\, I - U_{C1} - U_{C2}. \qquad (1.6)$$

Tyto modely ale nerespektují změny vlastností baterie při změně její teploty, stavu nabití a degradace což je možné vyřešit pomocí prvků s proměnnými parametry, které jsou závislé na dané veličině [6].

1.5.5.4 PNGV model

Partnerstvím americké vlády a třech hlavních amerických automobilových koncernů určených pro vývoj nové generace elektrických vozidel vzniknul na začátku tohoto století model s názvem PNGV, vycházející z Théveninova modelu prvního řádu. Schéma je možné vidět na obrázku níže [6].



Obr. 1.8 Théveninův model druhého řádu

Přidáním kondenzátoru C_0 bylo docíleno přesnějšího popisu změn napětí v baterii a kompenzují se jím některé nedostatky Théveninova modelu. Model lze popsat jako

$$U_{out} = U_{Bat} - U_{C0} - R_0\, I - U_{C1}. \qquad (1.7)$$

Stejně tak jako v předešlém případě je možné model doplnit o prvky s proměnnými parametry, respektující změny vlastností baterie [6].

2 Identifikace modelu baterie

Cílem této práce je identifikace elektrického modelu baterie pro modelování výstupního napětí, který s dostatečnou přesností respektuje SOC, změny teploty a dynamické změny vlivem proměnné zátěže. Pro dosažení stanovených cílů byl zvolen Théveninův model prvního řádu, který při použití prvků s proměnnými parametry vyhovuje požadavkům. Základním předpokladem pro identifikaci modelu a splnění cílů práce je dostatečné množství naměřených dat lithiového článku zahrnující vliv teploty a zatížení.

2.1 Experimentální měření lithiového článku a sběr dat

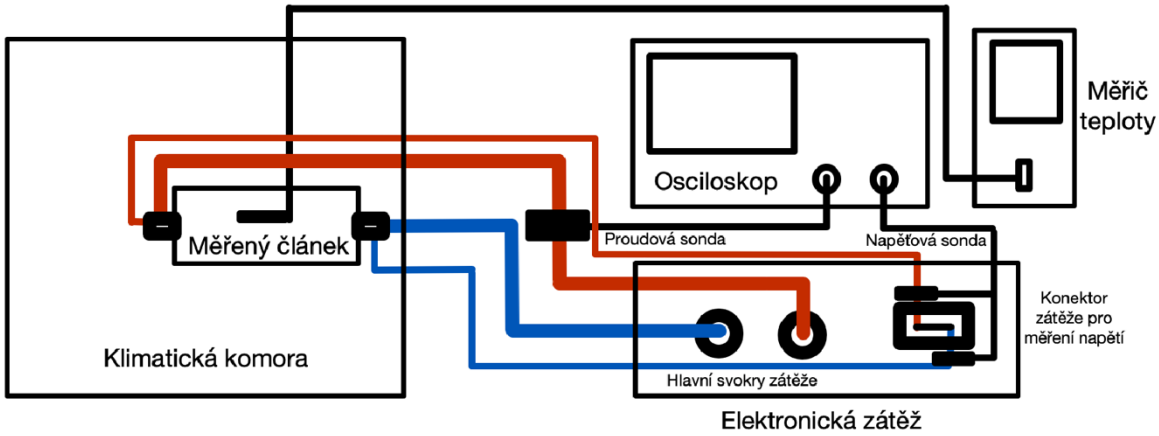
Pro identifikaci modelu byl vybrán článek typu NCR20700A od výrobce Sanyo Electric co., na kterém byly provedeny série měření. Základní parametry článku shrnuje tabulka 2.1.

Tab.2.1 Tabulka parametrů baterie

Typická kapacita [Ah]	*3,3*
Nominální napětí [V]	*3,7*
Minimální napětí [V]	*2,5*
Maximální nabíjecí napětí [V]	*4,2*
Maximální vybíjecí proud [A]	*30*
Maximální nabíjecí proud [A]	*2,2*
Teplotní rozsah vybíjení [°C]	*-20 až 60*

2.1.1 Použité přístroje

Měření probíhalo v laboratořích Západočeské univerzity na Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky (KEV) a na Katedře technologií a měření (KET). Článek byl vybíjen pomocí elektronické zátěže typu EA-EL 9080-200 s nastavitelným proměnným proudem (max. 200 A). Průběh vybíjecího proudu a napětí baterie bylo zaznamenáno Osciloskopem Tektronix DPO 4034B s připojenou proudovou sondou Tektronix TCP0030A. Série měření zahrnující vliv teploty byly provedeny v klimatické komoře. K měření teploty bylo použito zařízení Ahlborn Almeno 2590, byla snímána teplota okolí a teplota na vnějším plášti článku. Nabíjejí bylo realizováno pomocí laboratorního zdroje typu EX354RT AIM-TTI. Způsob zapojení přístrojů je naznačen na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Zapojení přístrojů pro měření článku

2.1.2 Metodika měření

Měření vybíjecích charakteristik probíhalo dvěma způsoby. První způsob představuje zatěžování článku po celou dobu konstantním proudem, čímž byly získány kompletní vybíjecí průběhy spolu s křivkou OCV, která byla měřena při velmi malém odebíraném proudu s délkou měření 6 hodin. Druhým způsobem bylo periodické vybíjení proudovými pulsy o délce trvání 5 sekund, kdy po každém pulsu následovalo odpojení zátěže po dobu 30 sekund pro zotavení napětí.

Velikosti vybíjecích proudů byly voleny vzhledem ke kapacitě článku jako 1C, 5C a 9C, v našem případě (C=3,3 Ah) tedy 3,3; 16,5 a 29,7 A. Okolní teploty pro měření byly vybrány tři kladné, nula a dvě záporné. Podrobněji to lze vidět v tabulce 2.2

Tab.2.2 Tabulka měřených teplot

Kladné teploty [°C]	*10*	*25*	*35*
Záporné teploty [°C]	*0*	*-5*	*-15*

Vybíjecí proudy a předpokládané časy vybití jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Tab.2.3 Tabulka zatěžovacích proudů

Velikost proudu vybíjecích proudů	*1C- 3,3 A*	*5C- 16,5 A*	*9C- 29,7 A*
Předpokládaná doba vybíjení I=kons. [min]	*60*	*12*	*6.7*
Předpokládaná doba vybíjení I pulsy [min]	*360*	*72*	*40*
Předpokládaná doba vybíjení 0.2C pro OCV [min]	*300*		

Vypočtené časy jsou pouze orientační, vycházející z teploty udávanou v datasheetu (25 °C) a pro maximální kapacitu. Záleží také na dalších okolnostech, jakými jsou aktuální skutečná kapacita nebo přesnost zátěže. Reálné doby vybíjení často překračovaly předpokládané odhady (viz Tab. 2.3). Před každým měřením bylo ještě nutné článek aklimatizovat při aktuální teplotě měření, aby se vnitřní teplota co nejvíce přiblížila okolní. Pro aklimatizaci článku byla zvolena doba 1 hodina.

Nabíjení bylo realizováno s dodržením maximálního dovoleného nabíjecího proudu 2,2 A. Ve většině případů bylo nabíjeno spíše nižším proudem, který je pro článek šetrnější. Dále je pro relevantní data potřeba zachovat z důvodu chemických reakcí v baterii podobný interval mezi nabíjením článku a měřením. V tom případě je interval mezi 16-20 hodinami. Cílem bylo zachování možnosti provést jedno měření a následné nabití během jediného dne.

Při identifikaci matematického modelu baterie je nutné zohlednit časovou náročnost sběru dostatečného množství dat (přibližně 180 hodin) související zejména s délkou vybíjení a množstvím opakování pro stanovené teploty okolí.

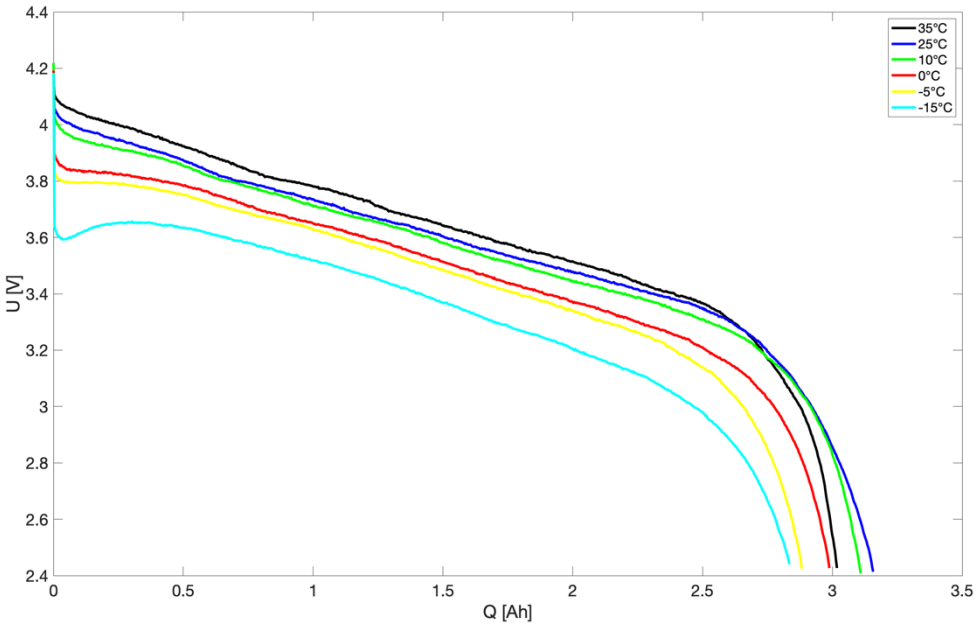
2.2 Výsledky měření a analýza vlastností článku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1, hlavní parametr je kapacita, která závislá na několika vlivech, přičemž mezi nejdůležitější je možné zařadit teplotu a velikost vybíjecího proudu. Z výsledků měření lze tyto závislostí blíže popsat.

2.2.1 Vliv teploty

Na obrázku 2.2 je vidět závislost kapacity baterie na teplotě při vybíjení konstantním proudem 1C, tedy 3,3 A. Nejvyšší kapacita byla identifikována při teplotě 25°C, což je v souladu s parametry uvedenými v dokumentaci. S nižšími teplotami dochází k výraznému poklesu využitelné energie. V souladu s předpoklady, nejnižší naměřená kapacita byla naměřena při nejnižší stanovené teplotě měření -15°C. Při této teplotě je možné odebrat z článku náboj 2.8 Ah na rozdíl od 3.2 Ah při 25°C. Ve všech případech dochází k zahřívání článku, které se nejrychleji projevuje uvnitř a postupně proniká k povrchu článku, kde je měřitelné se zpožděním. Každá vybíjecí charakteristika v sobě zahrnuje přechod z křivek platných pro nižší teplotu na křivky pro vyšší teplotu, u záporných teplot je tento přechod výraznější a je patrný počáteční propad napětí. V případě nejnižší měřené teploty -15°C je

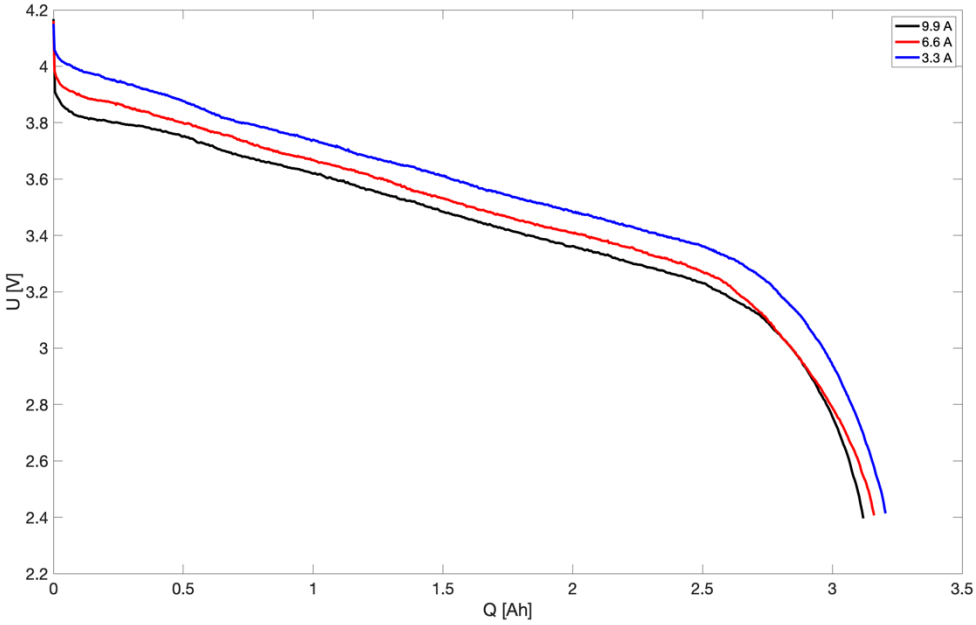
mezi počátkem a závěrem měření nárůst teploty o 8°C. S vyššími proudy se nárůst teploty zvětšuje. Změna teploty souvisí se změnou odporu baterie což je podrobněji popsáno v kapitole 2.3. Využitelná kapacita s teplotou roste, ale pouze do teploty 25°C. Nad touto hodnotou dochází opět ke snížení. Z obrázku je možné pozorovat, že využitelná kapacita článku je při teplotě 35°C podobná jako je při teplotě 0°C. To je opět spojeno s vnitřním odporem baterie, který s teplotou klesá.



Obr. 2.2 Vybíjecí charakteristiky při různých teplotách konstantním proudem 1C

2.2.2 Vliv vybíjecího proudu

Dalším výrazným vlivem určující výslednou kapacitu je velikost vybíjecího proudu, jak je vidět na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Vybíjecí charakteristiky pro různé vybíjecí proudy při teplotě 25°

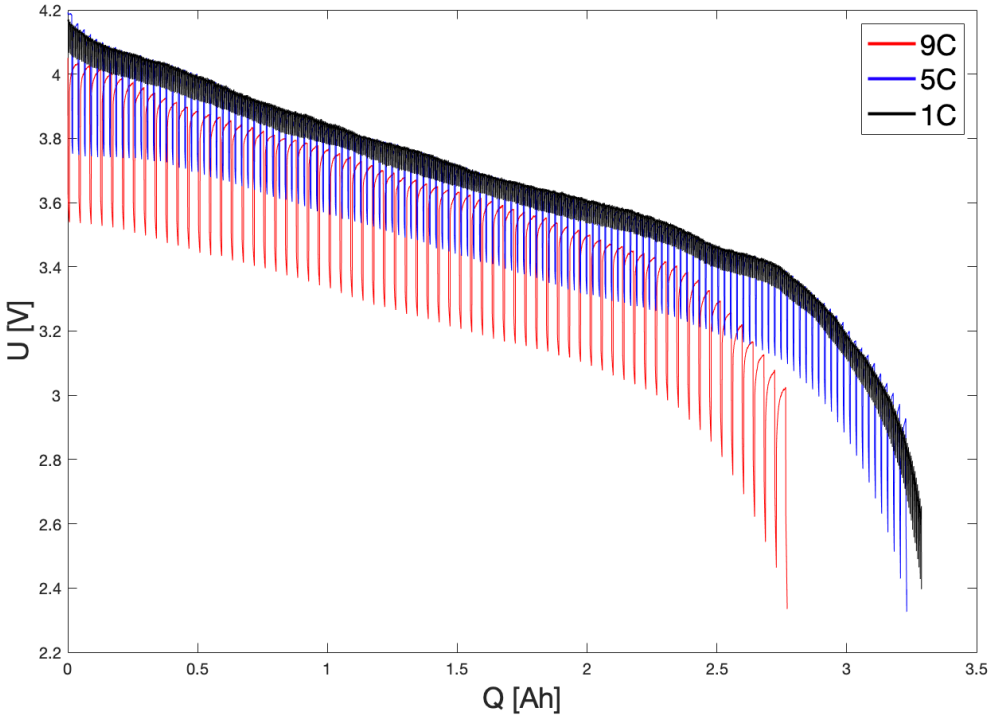
Zobrazené průběhy jsou změřeny při teplotě 25°C. Z již zmiňovaného důvodu zvyšování teploty a nutnosti následného ukončení měření při teplotě nad 60 °C nebyly pro proudy 5C a 9C doměřené celé vybíjecí průběhy. Proto je zde uvedeno porovnání charakteristik pouze pro nižší vybíjecí proudy, které byly dodatečně změřeny. Z těchto dat je čitelné snížení kapacity při zatížení vyšším proudem, což má opět souvislost s vnitřním odporem baterie, který způsobí tepelné ztráty, a výsledná kapacita se tedy snižuje. Popis tohoto jevu nám vyjadřuje Peukertův zákon:

$$IT = Q_C \left(\frac{Q_C}{IH}\right)^{k-1}, \qquad (1.7)$$

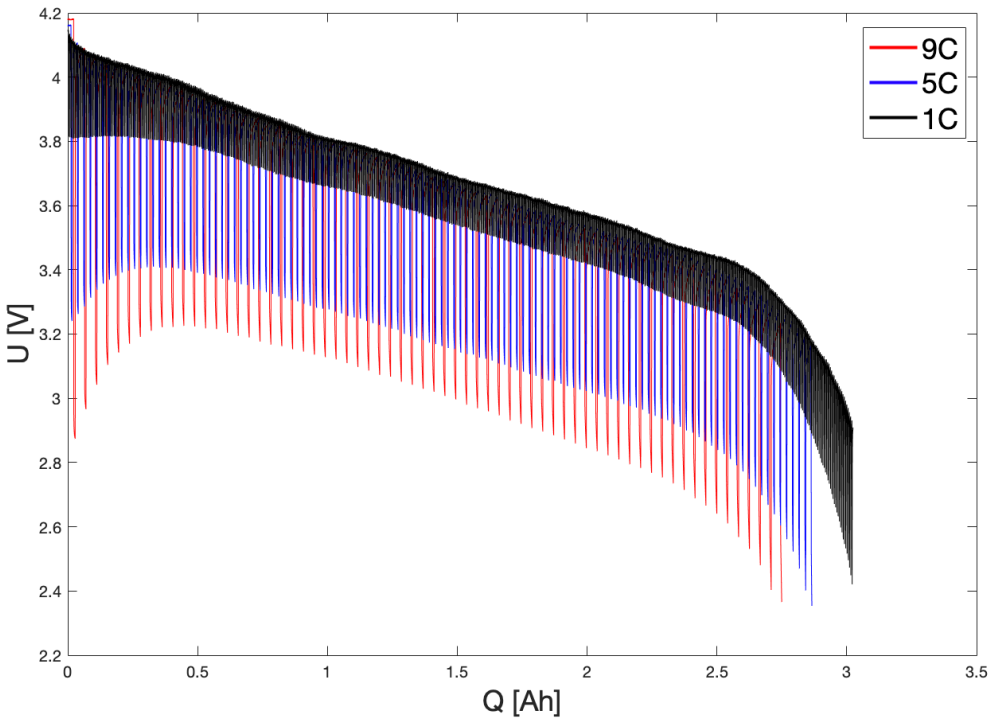
kde I vybíjecí proud, Q_C udávaná nominální kapacita, T čas vybití při zatěžování proudem I, H čas vybití při nominální hodnotě proudu a k je Peukertova konstanta, která je závislá na typu baterie pohybující se od 1 do 1,5 [15].

2.2.3 Vybíjecí charakteristiky s pulsním vybíjením

Druhým způsobem je vybíjení proudovými pulsy. Jedná se o hlavní data, pomocí kterých probíhá identifikace parametrů. Na obrázcích 2.4 a 2.5 jsou tyto charakteristiky vyobrazeny při různých proudech a teplotách 25° a -5°C.



Obr. 2.4 Vybíjecí charakteristiky s pulzním vybíjením pro různé proudy při teplotě 25°C

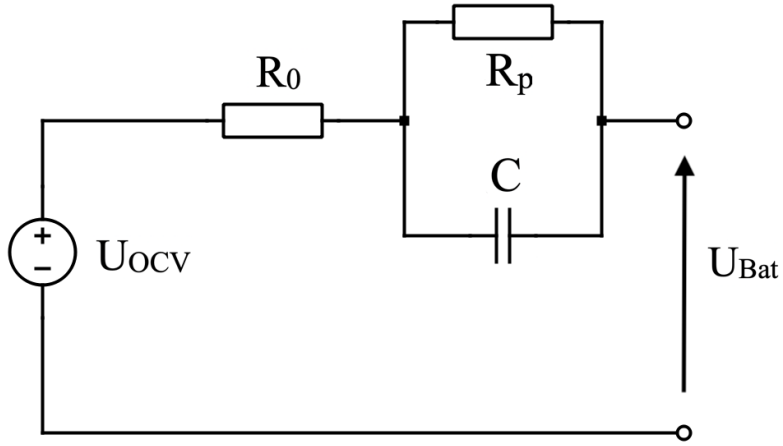


Obr. 2.5 Vybíjecí charakteristiky s pulzním vybíjením pro různé proudy při teplotě -5°C

Je patrné, že závislosti potvrzují vliv teploty i velikosti vybíjecího proudu na využitelnou kapacitu, jak bylo uvedeno v předchozí části této kapitoly.

2.3 Identifikace parametrů modelu

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, pro splnění cílů práce byl vybrán Théveninův model (viz obr. 2.6), poskytující dostatečnou přesnost při použití proměnných parametrů.

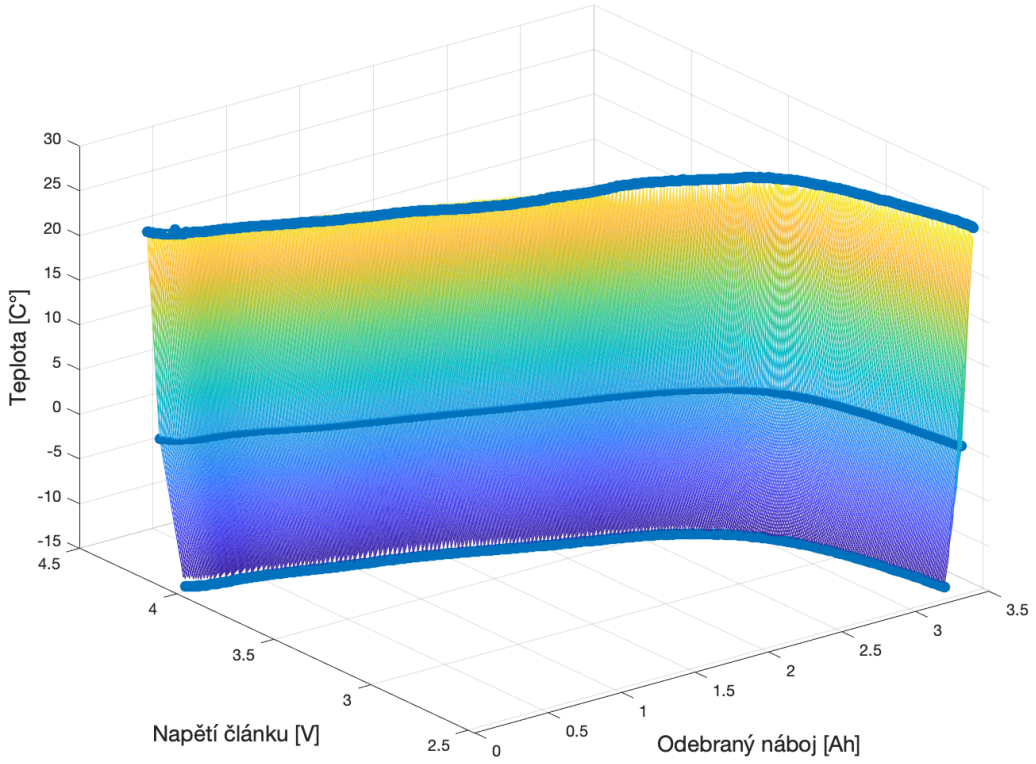


Obr. 2.6 Zvolený Théveninův model prvního řádu pro modelování lithiového článku

2.3.1 Identifikace OCV

Jako první potřebný parametr pro sestavení modelu je napětí článku naprázdno neboli anglickým označením OCV (open-circuit voltage). Tím se rozumí závislost napětí nezatíženého článku na stavu nabití. Z důvodu extrémní časové náročnosti měření skutečného OCV (ustáleného nezatíženého článku) byla identifikace závislosti OCV provedena pomocí vybíjení článku minimálním proudem způsobujícím zanedbatelné oteplení či úbytek napětí. V tomto případě byl zvolen vybíjecí proud o velikosti 0,2 C, jmenovitě 0,66 A. Pro stanovení závislosti na teplotě proběhla tři měření OCV při okolní teplotě -15, 0 a 25°C.

Pro získání kompletní závislosti OCV na teplotě a velikosti odebraného náboje bylo potřeba interpolovat prostor mezi naměřenými křivkami. Vlastní interpolace byla provedena pomocí funkce griddata() v prostředí Matlab. Z těchto dat vznikla 3D mapa, díky které je možné v rámci modelu identifikovat při dané teplotě a SOC (případně odebraného náboje) aktuální napětí článku. Výslednou závislost OCV ukazuje obrázek 2.7.

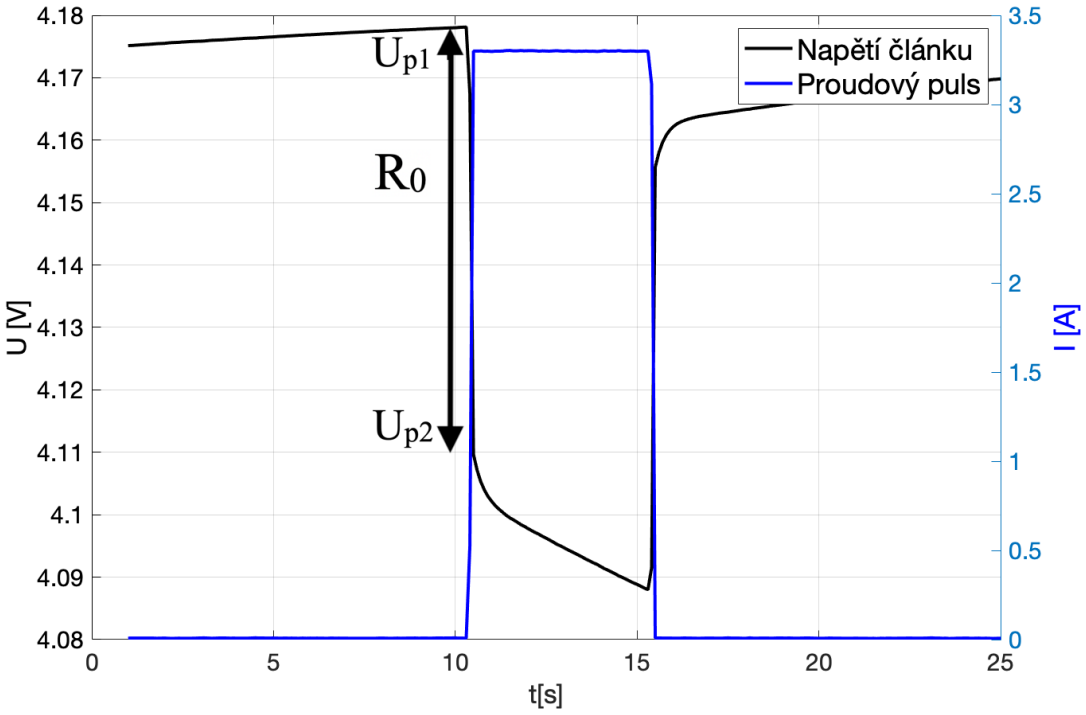


Obr. 2.6 Závislost napětí nezatíženého článku (OCV) na teplotě a velikosti odebraného náboje

2.3.2 Identifikace odporu R_0

Identifikace R_0 je klíčová pro správnou funkci vybraného Théveninova modelu. Tento parametr je dominantní při modelování přechodových dějů skokového zatěžování a odpojení zátěže. Současně vnitřní odpor modeluje dominantní část ztrát článku a má hlavní vliv na výslednou kapacitu baterie při změnách teploty či vybíjecího proudu. Prvky R_0, R_p a C jsou identifikovány z měření, při němž byl článek zatěžován proudovými pulsy.

Na obrázku 2.8 můžeme vidět detail křivky napětí při zatížením jedním proudovým pulsem. Vybrané části přechodového děje jsou použity pro identifikaci parametrů. V případě odhadu vnitřního odporu R_0 je klíčový skokový pokles napětí při připojení zátěže, v obrázku ohraničen limity U_{p1} a U_{p2}



Obr. 2.8 Detail přechodového děje při skokovém zatížení stanoveným proudovým pulzem, použitý pro identifikaci odporu R_0

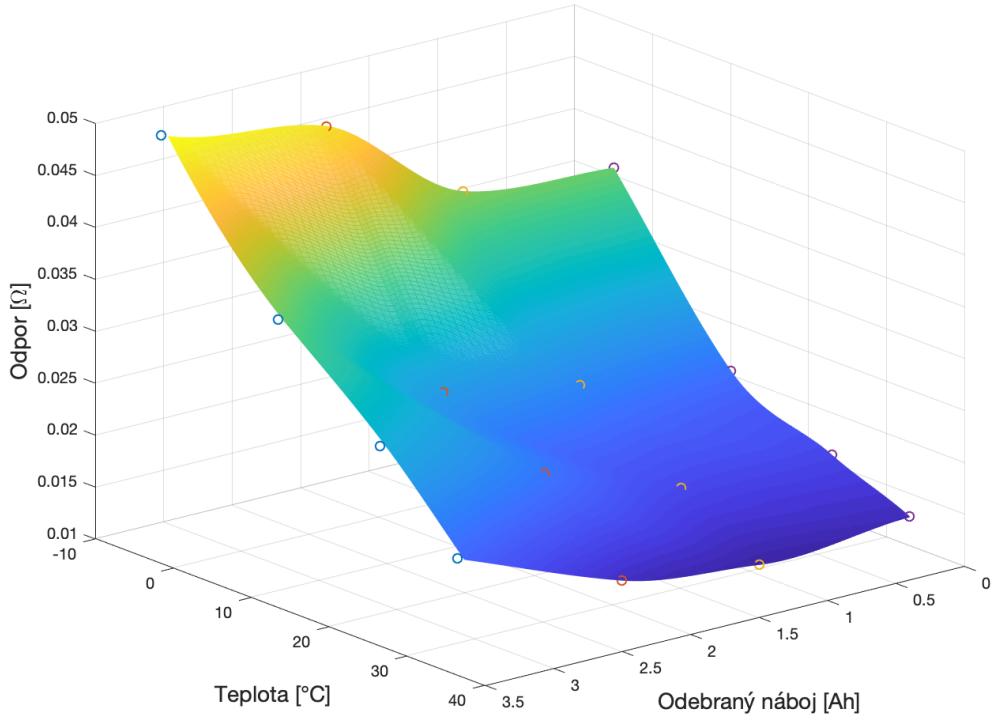
Ten lze jednoduše určit pomocí Ohmova zákona dle následující rovnice:

$$R_0 = \frac{U_{p1} - U_{p2}}{I}, \qquad (2.1)$$

kde U_{p1} je napětí v čase začátku působení proudu, tedy přibližně OCV, a napětí U_{p2} je konečná hodnota napěťového skoku před tím, než se začne projevovat nabíjení kondenzátoru sousedního RC článku, jak je zobrazeno na obrázku výše. Následuje aperiodický děj, kdy dochází k nabíjení zmíněného kondenzátoru RC článku a je promítnut vliv parametrů R_p a C. Při analýze přechodového děje vycházíme z počátečního stavu, kdy napětí na C nezatížené baterie je nulové (R_p je připojeno paralelně k C a tedy C je vybit přes R_p). V okamžiku připojení zátěže skokově naroste proud, přičemž $U_c = 0$ a proud tedy teče výhradně přes kondenzátor. Proto můžeme v této fázi psát, že úbytek napětí baterie je roven výhradně úbytku na vnitřním odporu R_0.

Z důvodu závislosti na teplotě bylo potřeba manuálně odečíst tyto hodnoty z měření při různých teplotách. Dále bylo nutné použít pouze data z měření při zatížení proudovými pulzy o velikosti 1C, kde nedochází na rozdíl od vyšších proudů k velké změně teploty

článku a změřená teplota na povrchu se dá při zjednodušení považovat za teplotu vnitřní. Jak již bylo zmíněno dříve, vnitřní odpor R_0 je závislý nejen na teplotě, ale i na stavu nabití. Z každého průběhu vybíjení bylo tedy odečteno 5 hodnot v různých stavech nabití. Všechna odečtená data byla seskupena a následně interpolována, podobně jako u závislosti OCV, pomocí funkce griddata() v prostředí Matlab. Výsledkem je 3D mapa, která popisuje závislost odporu R_0 na teplotě a odebraném náboji.

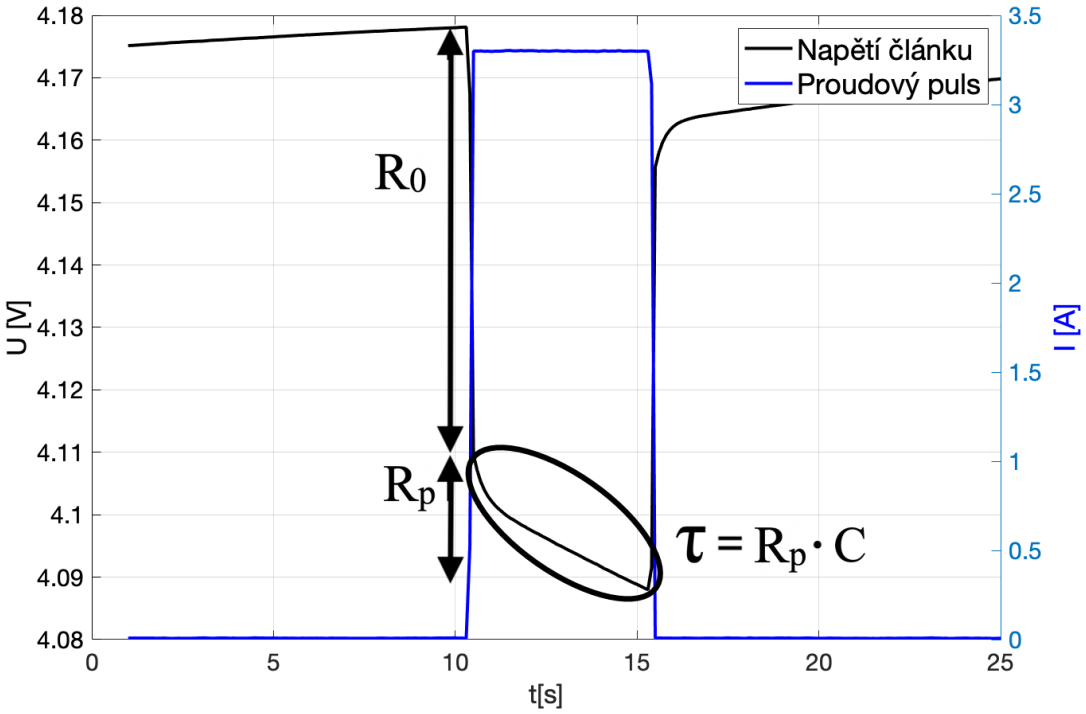


Obr. 2.9 Identifikovaná závislost R_0 na teplotě a odebraném náboji

Jak je patrné z výsledných dat, jež jsou vidět na obrázku 2.9, závislosti na teplotě i stavu nabití jsou výrazné a za určitých podmínek odpor několikanásobně převyšuje své minimální hodnoty. Největší změna nastává zejména vlivem teploty. Nejmenší velikost identifikovaného odporu je při nejvyšší měřené teplotě. Se snižující se teplotou dochází k značnému růstu až do nejnižší měřené teploty, kdy je velikost odporu R_0 2,5 krát větší než při teplotě 35°C. Vzhledem ke stavu nabití se velikost R_0 v první části vybíjení příliš nemění, větší změna přichází až při 30% využitelné kapacity, kdy se začíná zvyšovat až do nejvyšší hodnoty v posledních procentech kapacity. Nárůst nedosahuje takových hodnot, jako při závislosti na teplotě, jejíž vliv je velmi výrazný. Tím dosahujeme menší využitelné kapacity při nízkých teplotách.

2.3.3 Identifikace odporu RC článku

Jak můžeme vidět na obrázku 2.10, z nelineární části přechodového děje lze identifikovat parametry R_p a C.



Obr. 2.10 Nelineární část přechodového děje relevantní pro identifikaci parametrů R_p a C

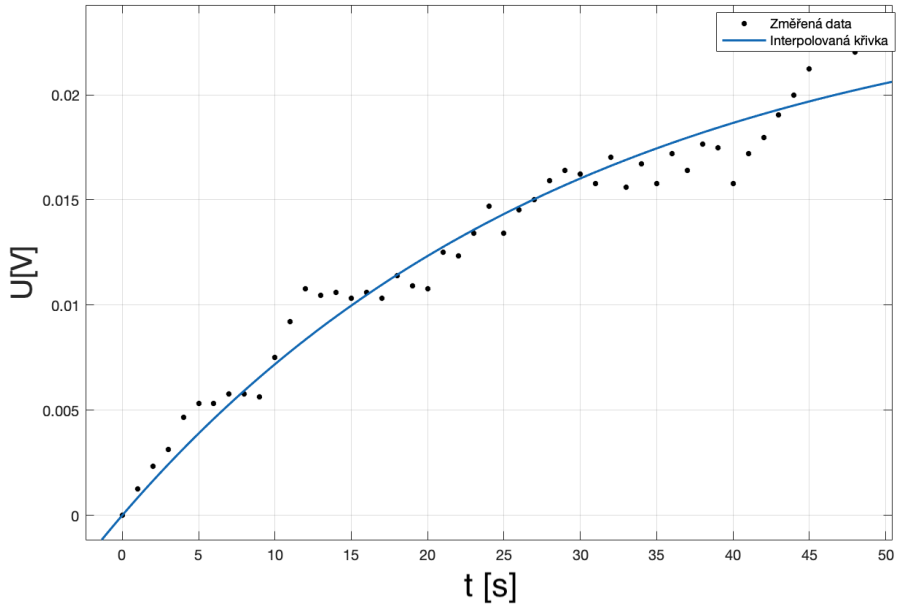
Proložení jedinou exponenciálou je možné, nicméně mnohem přesnější je proložení dvěma exponenciálami dle rovnice (odpovídá dvěma RC článkům):

$$U_{out} = -R_{p1} I_0 \left(e^{-\frac{t}{R_{p1} \cdot C_1}} \right) - R_{p2} I_0 \left(e^{-\frac{t}{R_{p2} \cdot C_2}} \right) + \left(R_{p2} R_{p1} \right) I_0. \qquad (2.2)$$

Proložení pomocí dvou exponenciálních křivek bylo použito, otestováno a umožnilo velmi přesnou aproximaci přechodového děje. Identifikace parametrů exponenciálních funkcí však není jednoznačná úloha a má více řešení, což znemožňuje následující krok, tj. identifikaci závislosti parametrů RC článku na teplotě a zatěžovacím proudu. Proto bylo přikročeno k jednoduššímu modelování nelineární části přechodového děje pomocí jediného RC článku s proměnnými parametry dle rovnice:

$$U_{out} = -R_p \, I_0 \left(e^{-\frac{t}{R_p * C}} \right) + R_p \, I_0. \qquad (2.3)$$

Tento model s dostatečnou přesností modeluje přechodové děje a vyhovuje finální aplikaci. K identifikaci parametrů byla použita aplikace Curve fitting z programu Matlab, která poskytuje možnost proložení změřených bodů pro zadanou rovnici se zobrazením jejich parametrů. Příklad identifikace lze vidět na obrázku 2.11.



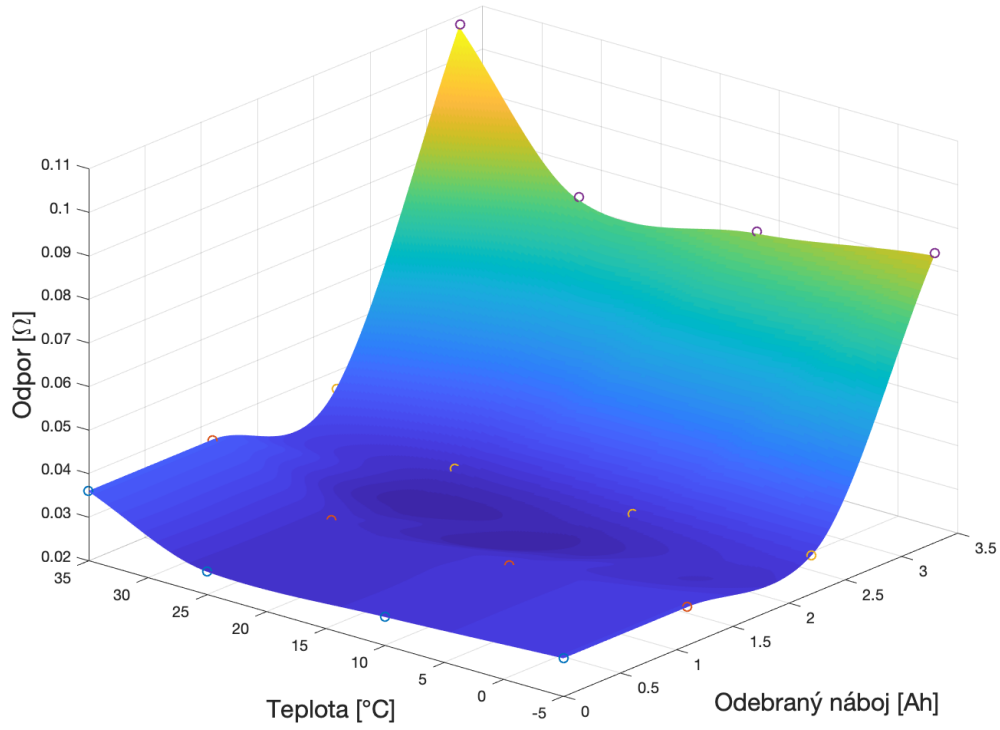
Obr. 2.11 Detail nelineární části přechodového děje a její proložení exponenciální křivkou

Pro identifikaci parametrů RC článku byly vybrány stejné přechodové děje jako pro identifikaci R_0 (tj. stejné teploty a vybíjecí proud 1C). U vyšších proudů docházelo při identifikaci k problémům, zejména při rozlišení lineární a nelineární části přechodového děje.

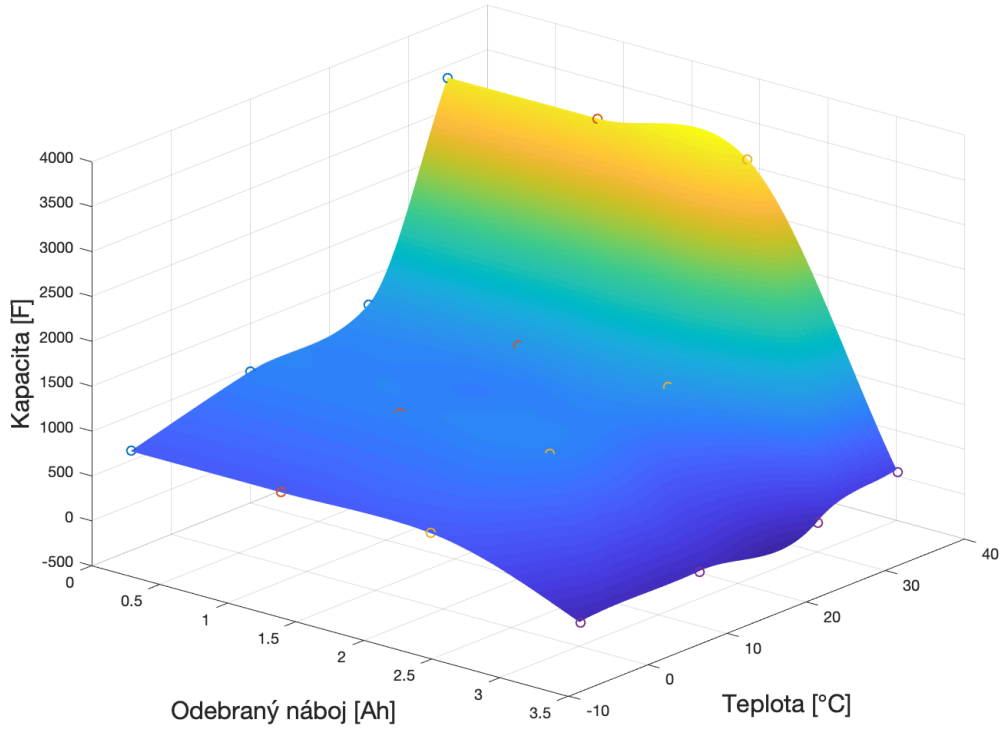
2.3.4 Identifikace proměnných parametrů RC článku

Analýzou série měření na bateriovém článku byla zjištěna výrazná závislost parametrů RC článku na teplotě a stavu nabití. Proto bylo přikročeno k modelu s proměnnými parametry a byla provedena identifikace závislostí těchto parametrů právě na teplotě a stavu nabití baterie. Ke konci vybíjení dochází ke značné změně tvaru křivek, ale ze stejných důvodů jako u vyšších proudů, je problematické odlišit lineární a nelineární část přechodového děje. Z naměřených dat bylo tedy vyvozeno, že změna se začne ve velké míře projevovat zhruba při zbývajících 15% kapacity. Od této hodnoty se parametry výrazně mění. Odpor R_p se začne zvyšovat až na hodnotu třikrát větší než u identifikovaného pulsu ve středu průběhu. Velikost kapacity C se naopak snižuje a na konci vybíjení je přibližně desetkrát menší. Pro přesnější výsledky modelu byly tedy vytvořeny (jako v případě OCV)

mapy závislosti na stavu nabití a teplotě, a to pomocí funkce griddata() v prostředí Matlab, jak ukazuje obr. 2.12 a obr. 2.13.



Obr. 2.12 Identifikovaná závislost R_p na teplotě a odebraném náboji



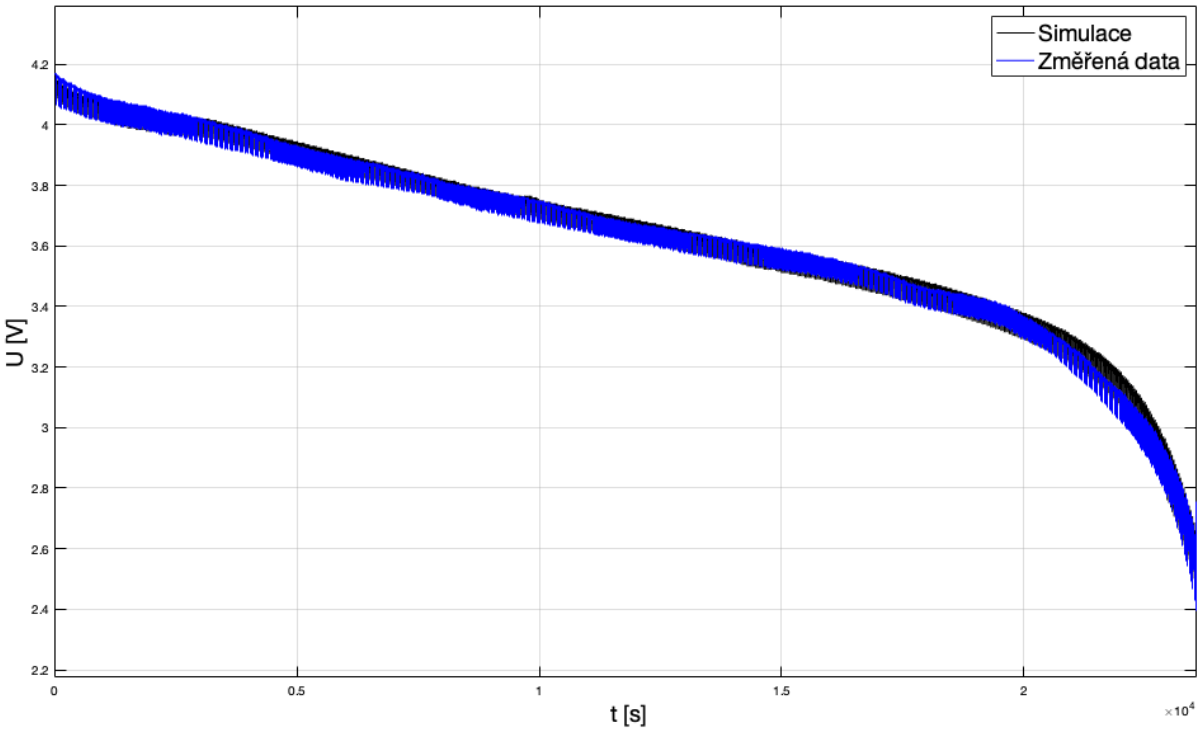
Obr. 2.13 Identifikovaná závislost C na teplotě a odebraném náboji

Jak lze vidět, parametr R_p je výrazně závislý na stavu nabití, vzhledem k teplotě nedochází k velké změně. Naopak na kapacitu C má podobně jako u odporu R_0 velký vliv teplota a naopak závislost na odebraném náboji je takřka minimální.

2.4 Verifikace modelu baterie pomocí výsledků měření

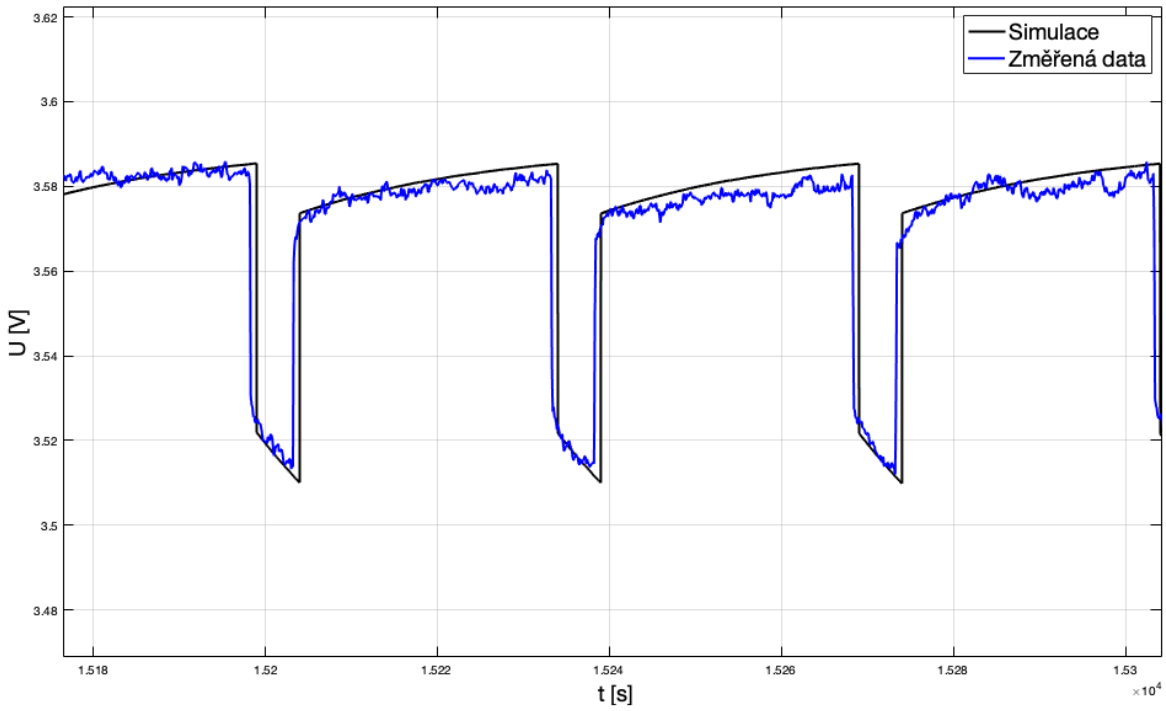
Výsledný model s proměnnými parametry je možné porovnat s reálnými výsledky měření. Všechny parametry včetně napětí OCV jsou závislé na teplotě, parametry R_0, R_p a C jsou pak závislé také na stavu nabití. Jak je ukázáno v následující části, výsledný model poskytuje dostatečnou přesnost. Kompletní výsledky jsou pak uvedeny v příloze.

Na následujícím obr. 2.14 je uvedeno porovnání výstupu modelu a změřené křivky průběhu pulzního vybíjení proudem 1C při teplotě 25°C. Modrá křivka reprezentuje měřená data a černá výsledek simulace.



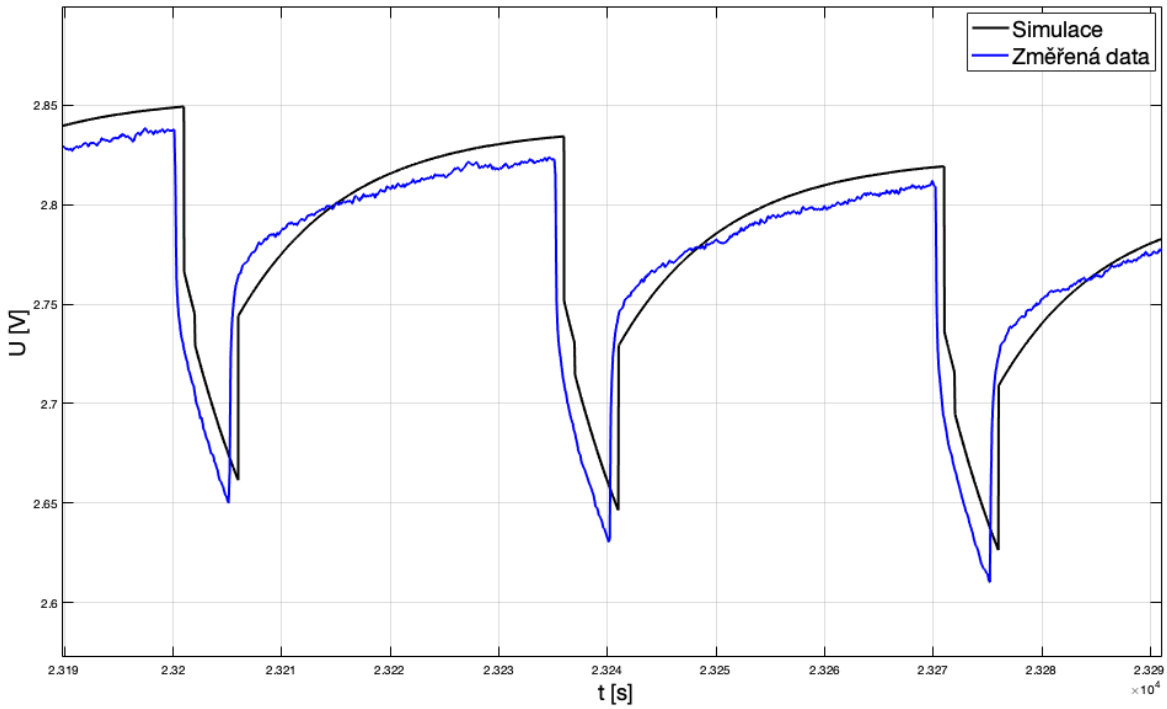
Obr. 2.14 Porovnání výstupu modelu a naměřených dat: vybíjení proudem 1C při teplotě 25°C

Z tohoto pohledu lze vidět, že se křivky ve velké části překrývají a jsou si velmi podobné. Menší rozdíly jsou způsobeny interpolací funkcí griddata(), díky které nejsou reprezentovány poklesy a simulovaný průběh je celkově hladší. Pro názornější porovnání můžeme na obrázcích 2.15 a 2.16 vidět vybrané detaily, kde je možné lépe porovnat identifikované parametry.



Obr. 2.15 Porovnání výstupu modelu a naměřených dat: vybíjení proudem 1C při teplotě 25°C- detail střední části průběhu

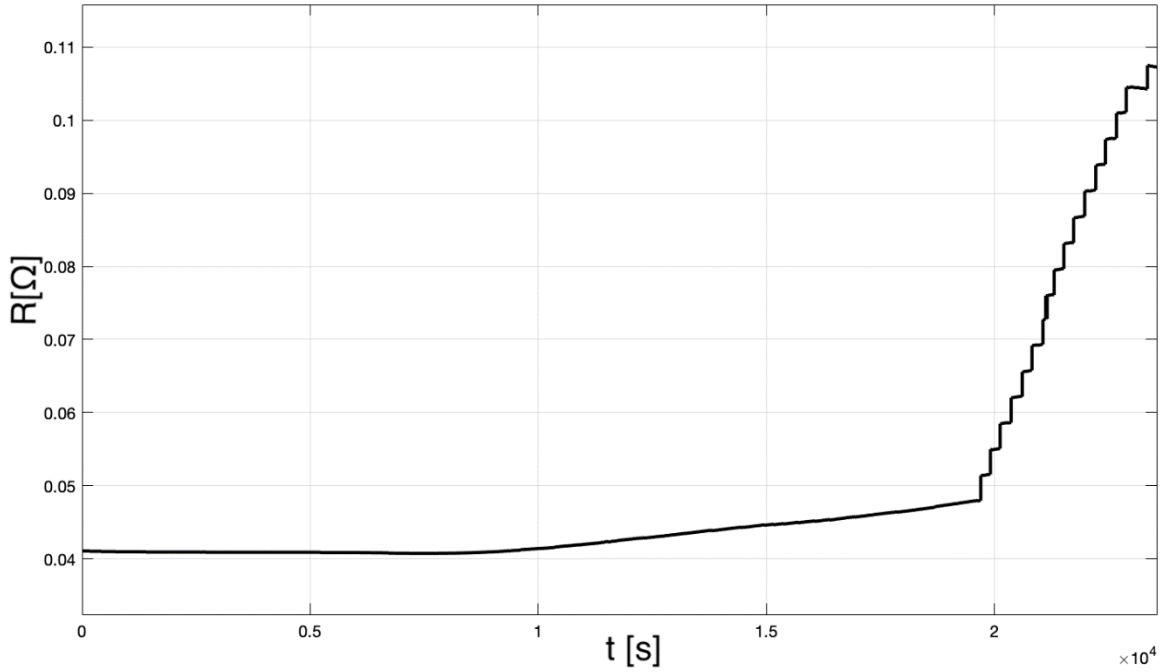
Na obr. 2.15 je zobrazen detail střední části z průběhu na obr. 2.14, která byla jedním z podkladů pro identifikaci parametrů. Je patrné, že výsledný model poskytuje dostatečnou přesnost a s velmi malými odchylkami modeluje chování bateriového článku. Menší odchylky jsou patrné spíše v nelineární části přechodového děje pulzního vybíjení (viz obr. 2.15), nicméně pro cílovou aplikaci je výstup modelu vyhovující. Vzhledem ke změně parametrů v průběhu vybíjení se mění i tvar exponenciály. Detail závěrečné části vybíjení je na obrázku 2.16.



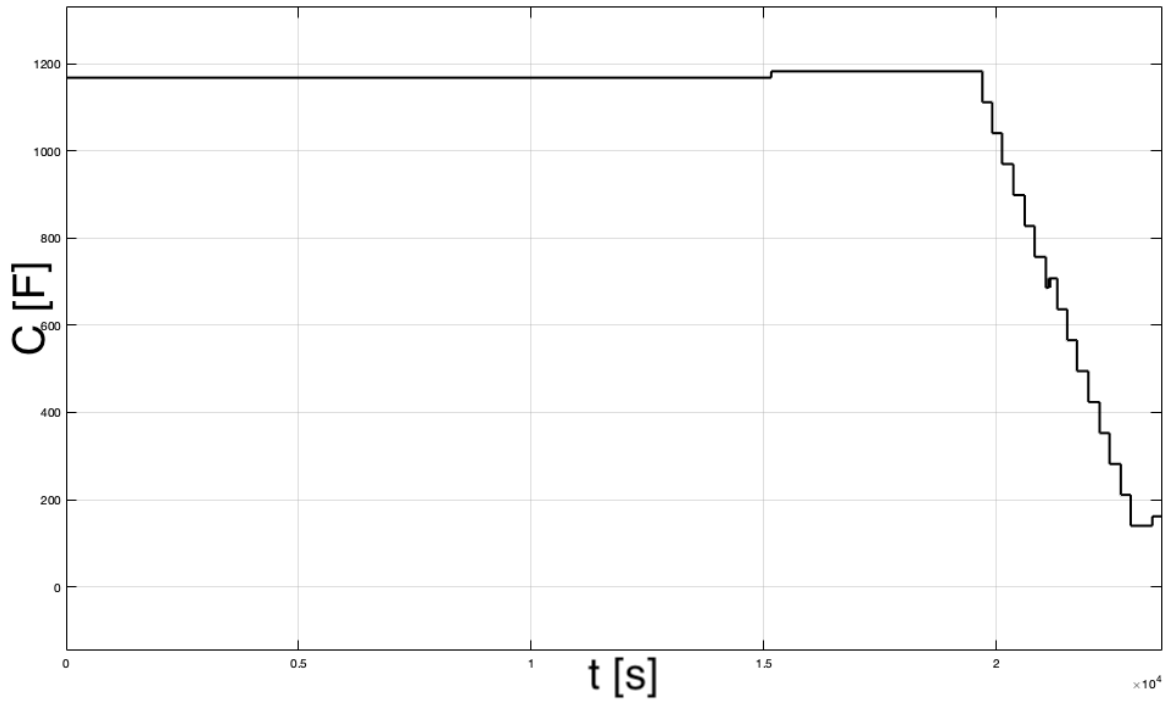
Obr. 2.15 Porovnání výstupu modelu a naměřených dat: vybíjení proudem 1C při teplotě 25°C- detail závěrečné části

I přes velmi výraznou změnu parametrů v nelineární části, která se nejvíce projevuje v závěru vybíjení, je přesnost modelu stále dostatečná. Změnu teploty při vybíjecím proudu 1C je možné pro zjednodušení zanedbat a sledovat závislost pouze na stavu nabití.

Na obrázcích 2.16 a 2.17 můžeme vidět změnu identifikovaných parametrů v čase vycházejících z průběhu vybíjení zobrazeného na obr. 2.13.



Obr. 2.16 Změna celkového odporu R (R_0 + R_p) v čase při pulzním vybíjení proudem 1C a teplotě 25°C



Obr. 2.17 Změna kapacity C v čase při pulzním vybíjení proudem 1C a teplotě 25°C

Druhý průběh na obr. 2.18 ukazuje vybíjení pulzním proudem 5C při teplotě -5°C. Podobně jako v předchozím případě poskytuje identifikovaný model baterie dostatečnou přesnost; větší odchylku lze pozorovat pouze v závěru vybíjení.

Je důležité zmínit, že vzhledem k vyššímu proudu dochází již k rozdílu vnitřní a měřené teploty na plášti. Aby byl výsledný průběh odpovídající, musíme tedy přidat vhodnou korekci teploty. To je řešeno pomocí identifikace parametrů přímky metodou nejmenších čtverců dle vztahu:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b), \qquad (2.4)$$

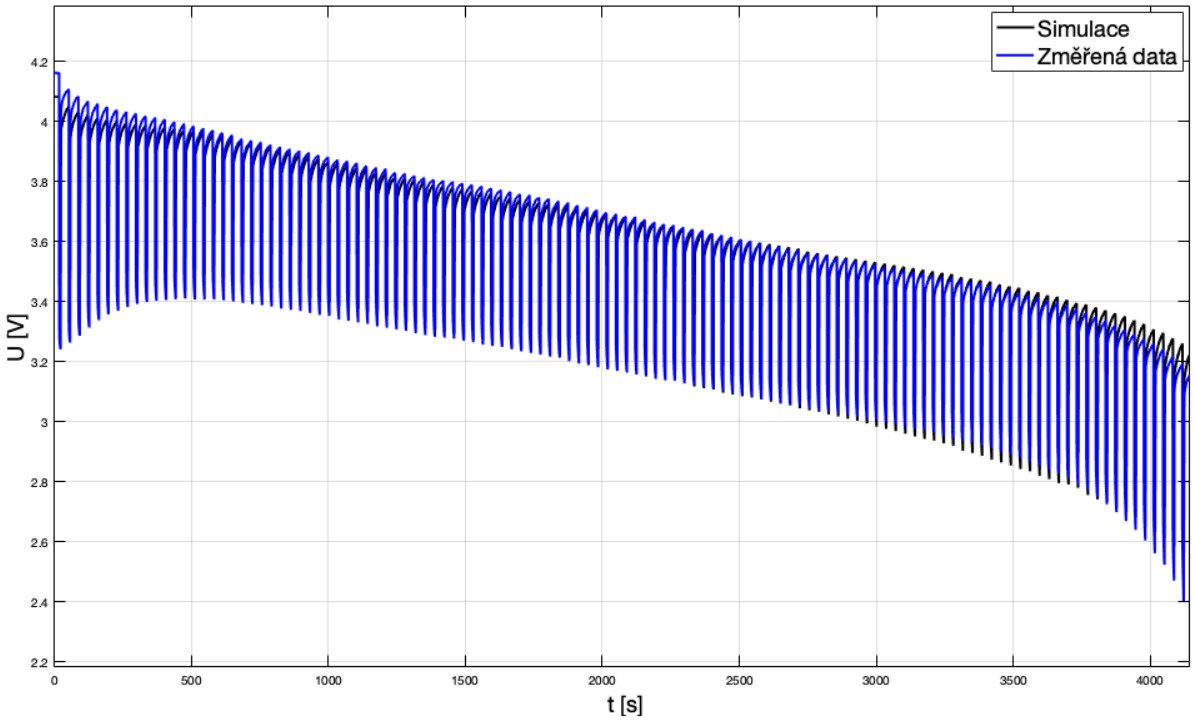
kde x je vektor parametrů přímky, A matice měřených proudů a b vektor teplotních posunů. Výsledná korekce teploty byla identifikována jako

$$\Delta T = 3.78 \cdot I - 1.25. \qquad (2.5)$$

Pro simulovaný případ vybíjení 5C je hodnota korekce +5°C (viz. Tab2.4.).

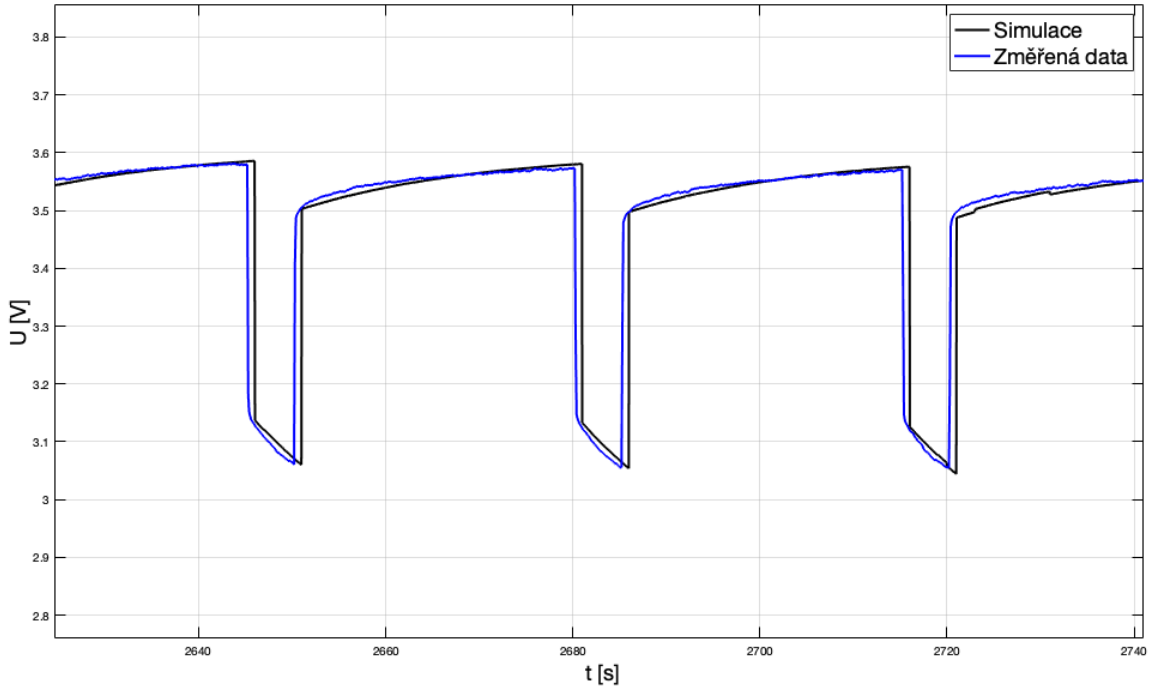
Tab.2.4 Tabulka korekce teploty

Vybíjecí proud [A]	*Korekce teploty ΔT [°C]*
1C	*0*
5C	*5*
9C	*10*



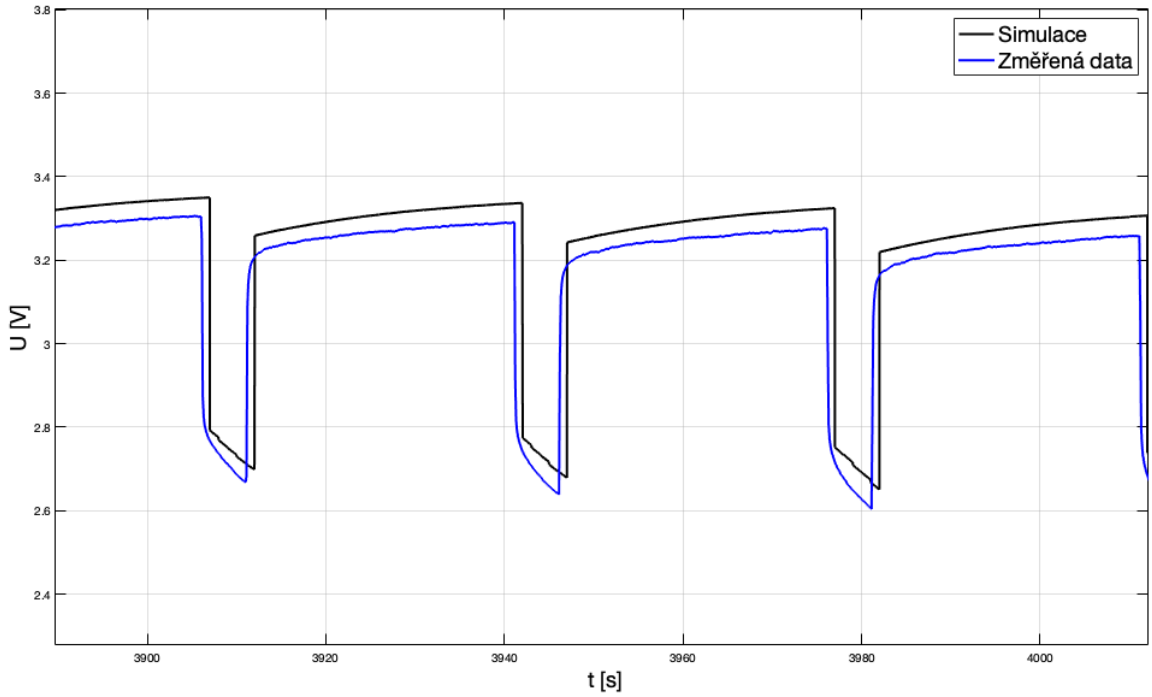
Obr. 2.18 Porovnání výstupu modelu a naměřených dat: vybíjení proudem 5C při teplotě -5°C

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.2, využitelná kapacita se při zatížení vyšším proudem snižuje. V našem případě zdroj napětí modelu vychází ze změřených charakteristik OCV, které byly změřeny při vybíjení malým proudem 0,66 A. Při vyšších hodnotách proudu pak dochází k větším odchylkám než u vybíjení malým proudem a využitelná kapacita simulovaného modelu je vyšší než u reálného článku.



Obr. 2.19 Porovnání výstupu modelu a naměřených dat: vybíjení proudem 1C při teplotě 25°C- detail střední části průběhu

Na obrázcích 2.19 a 2.20 jsou zobrazeny výřezy z průběhu obr. 2.18. U prvního, který je ze střední části vybíjení, je přesnost velmi vysoká. V druhém případě vidíme zmíněnou odchylku s vyšší kapacitou a s tím i související pomalejší změnu parametrů R_p a C.



Obr. 2.20 Porovnání výstupu modelu a naměřených dat: vybíjení proudem 5C při teplotě -5°C- detail závěrečné části

Při shrnutí simulačních výsledků můžeme říci, že vybraný Théveninův model prvního řádu dosahuje dostatečné přesnosti pro finální aplikaci. Model obsahuje proměnné parametry závislé na teplotě a SOC. U vyšších proudů je dosaženo menší přesnosti z důvodu závislosti kapacity na velikosti vybíjecího proudu, který není v modelu plně respektován (viz Tab 2.5).

Tab.2.5 Tabulka odchylky využitelné kapacity modelu

Vybíjecí proud [A]	*Průměrná odchylka využitelné kapacity modelu při různých teplotách*
1C	*0- 5%*
5C	*5- 10%*
9C	*8- 14%*

Pro snížení odchylky by bylo nutné model dále zpřesňovat, zejména v oblasti ztrát na vnitřním odporu. Nicméně to povede na další komplikaci modelu. I přesto je přesnost pro cílovou aplikaci dostatečná a model je vyhovujícím kompromisem mezi složitostí a přesností.

3 Ověření modelu baterie na modelu elektrického vozu

Výsledný model článku s identifikovanými proměnnými parametry byl ověřen na sestaveném matematickém modelu elektrického osobního vozu, který je podrobně popsán níže. Model lithiové baterie byl propojen s matematickým modelem elektromobilu. Cílem jejich spojení bylo simulační ověření a mimo jiné modelování dojezdů, zejména rozdílů v dojezdu daného vozu v závislosti na teplotě.

3.1 Model elektrického vozidla

3.1.1 Vybraný vůz

Vozidlo, které Pro vytvoření matematického modelu bylo zvoleno vozidlo Nissan Leaf, a to model 2017 s baterií o kapacitě 30 kWh. Soupis základních parametrů vozidla uvádí tabulka 3.1.

Tab.3.1 Tabulka parametrů vybraného vozidla Nissan Leaf 2017 [7]

Motor	
Výkon [kW]	*80*
Maximální moment [nM]	*254*
Maximální otáčky [rpm]	*10000*
Převodový poměr [-]	*9.4*
Baterie	
Kapacita [kW/h]	*30*
Napětí [V]	*360*
Ostatní parametry	
Maximální rychlost [km/h]	*145*
Zrychlení z 0-100 km/h [s]	*11.5*
Hmotnost [kg]	*1545*
Součinitel odporu vzduchu	*0.29*
Čelní plocha vozidla [m^2]	*2.34117*
Dojezd podle cyklu NEDC [km]	*250*
Dojezd podle cyklu WLTP [km]	*-*

3.1.2 Pohyb modelu elektrického vozu

Při vytváření modelu bylo potřeba vycházet z obecně známých fyzikálních rovnic, které jsou nutné pro uvedení simulovaného vozidla do pohybu.

Pohyb hmotného bodu, v našem případě vozidla, vychází z druhého Newtonova zákona:

$$F = m\ a\,, \tag{3.1}$$

kde F je výsledná síla působící na vozidlo, a je zrychlení vozidla a m hmotnost.

$$F_m = \frac{M}{R} \tag{3.2}$$

Pro přepočet síly motoru na kolo je použit vztah (3.2), kde R je rameno, na které síla působí. V našem případě je to poloměr kola včetně pneumatiky.

Při známém zrychlení ze vztahu (3.1), získáme jeho integrací výslednou rychlost vozidla:

$$v = \int a\ dt + v_0. \tag{3.3}$$

3.1.3 Identifikace jízdních odporů

Síly působící proti síle elektrického pohonu jsou zejména jízdní odpory. Následující rovnice určuje vliv gravitační síly působící na vozidlo, závisející na sklonu α jeho dráhy.

$$F_G = \mathrm{g}\, m_v \sin\alpha, \tag{3.4}$$

Valivý odpor je určen jako

$$F_v = C_{rrr}\ F_G, \tag{3.5}$$

kde C_{rrr} je bezrozměrný koeficient valivého odporu a F_g je působící gravitační síla. Rovince (3.6) nám udává odpor, který je způsoben vnějším prostředím, v němž se vozidlo pohybuje. Aerodynamický odpor lze určit jako

$$F_0 = \frac{1}{2}\ C_x\ S\ \rho\ v^2, \tag{3.6}$$

kde C_x je součinitel vzdušného odporu, S čelní plocha vozidla, ρ hustota vzduchu a v je aktuální rychlost vozidla. V tabulce 3.2 jsou uvedeny finální parametry, které byly použity v matematickém modelu vozidla.

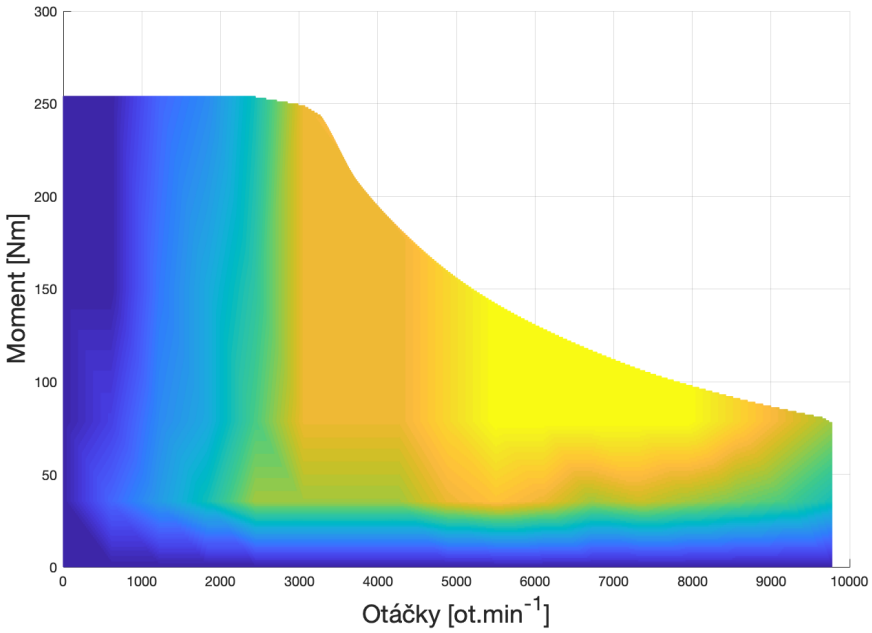
Tab.3.2 Tabulka parametrů vybraného vozidla Nissan Leaf použitých v matematickém modelu [7]

R [m]	*0.3234*
g [N/kg]	*9.81*
α [-]	*0*
C_{rrr} [-]	*0.08*
C_x [-]	*0.28*
S [m^2]	*2.34117*
ρ [$kg.m^{-3}$]	*1.1845*

3.1.4 Účinnost pohonného ústrojí

Důležitým parametrem pro simulační model jsou také účinnosti pohonu. Vedle účinnosti baterie, kterou zohledňuje výše diskutovaný model článku, se jedná zejména o účinnosti elektrického motoru, převodovky a měniče napětí. V případě převodovky a výkonového měniče nebyly pro simulovaný vůz Nissan Leaf nalezena konkrétní data a byly použity údaje nalezené v [8], kdy se účinnost obecně pohybuje v rozmezí od 95% do 98%. Pro simulace byla zvolena účinnost pro převodovky i výkonového měniče 97%.

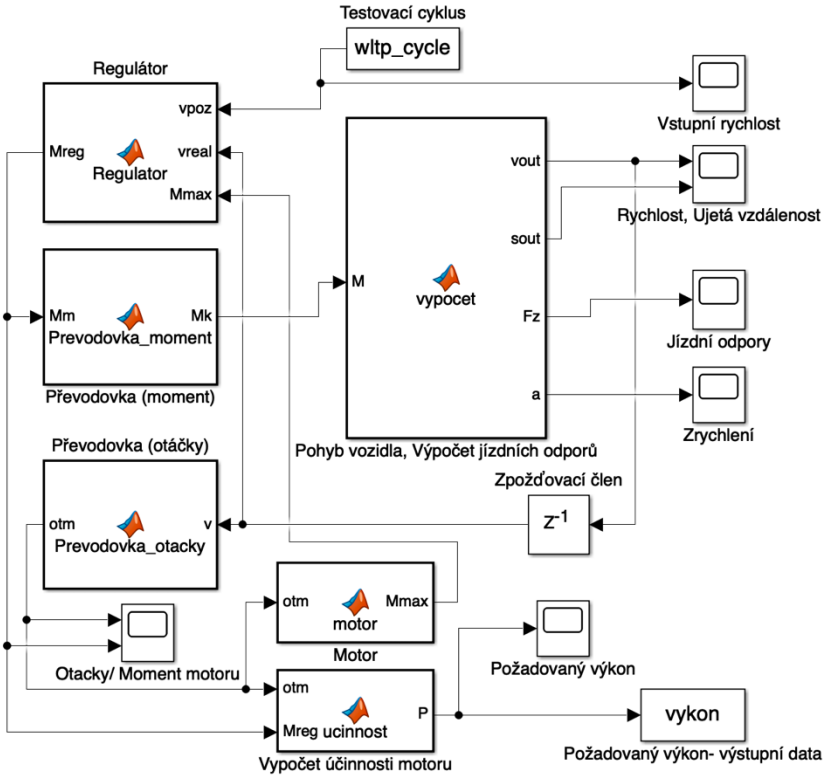
Klíčovým parametrem je účinnost elektrického motoru. Podrobné údaje o motoru vozu Nissan Leaf včetně jeho účinnostní mapy byly nalezeny v [8]. Uvedený motor je ze staršího modelu Nissan Leaf 2012, nicméně vyhovuje pro potřeby modelu vozu. Účinnostní mapa byla vytvořena pomocí známých údajů z [7] obdobně jako v případě proměnných parametrů modelu baterie (viz kapitola 2) pomocí funkce griddata() v prostředí Matlab. Kompletní účinnostní mapa je zobrazena na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Účinnostní mapa motoru použitá v sestaveném modelu vozidla

3.1.5 Schéma modelu

Na obrázku 3.2 je zobrazeno blokové schéma výsledného modelu vytvořeného v prostředí Matlab/Simulink na, kterém je naznačena funkce z poznatků uvedených v kapitolách 3.1.1- 3.1.4.



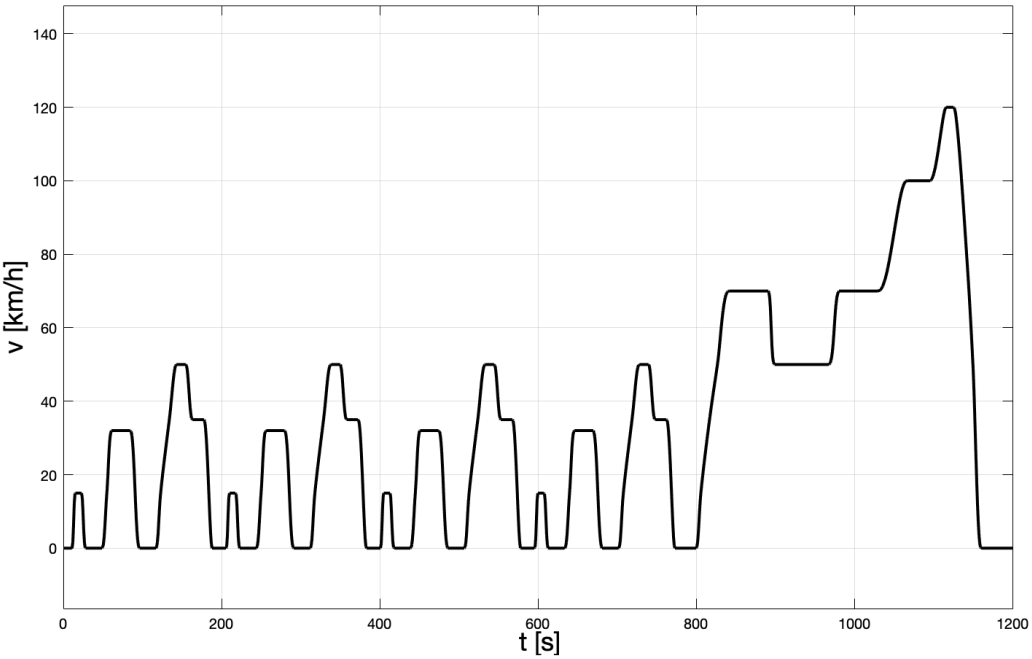
Obr. 3.2 Blokové schéma modelu elektrického vozidla

3.2 Metodika testování dojezdu elektrických vozidel

Měření dojezdu a spotřeby elektrické energie probíhá pomocí tzv. jízdních cyklů, ve kterých je simulován provoz vozu v různých provozních režimech, jakými jsou jízda ve městě, mimoměstský provoz a jízda po dálnici. Metodika však napříč kontinenty nebyla jednotná. Ve Spojených státech byl četně používaný tzv. FTP cyklus (Federal test procedure), v Asii převažoval cyklus JC08 a v Evropě pak cyklus NEDC (new european driving cycle). Nevýhodou je, že každý z nich je značně odlišný a výsledky se prakticky nedají celosvětově porovnávat. Proto vznikl celosvětově jednotný cyklus WLTP (world light test procedure), který by se měl více přibližovat reálnému provozu (zejména výstupy z NEDC se velmi vzdalovaly reálnému provozu) a umožnit porovnání spotřeb a dojezdů. V sestaveném matematickém modelu byly použity jízdní cykly NEDC a WLTP a pozornost je věnována porovnání spotřeb a dojezdů u těchto dvou cyklů relevantních prostředí Evropy, a to při různých teplotách [9].

3.2.1 NEDC cyklus

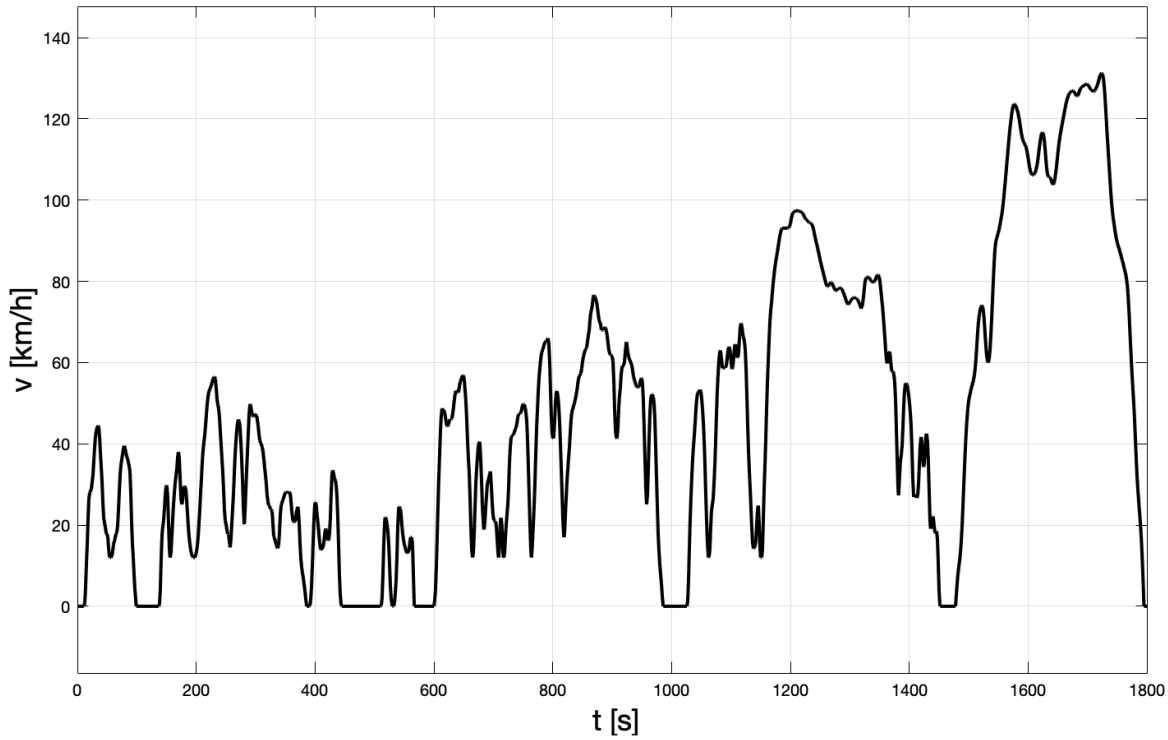
Metodika NEDC byla vyvinuta v Evropě na počátku 70. let minulého století. Byla používána především ke stanovení spotřeby a produkování emisí spalovacích vozidel. V pozdější fázi metodika byla aplikována také na elektromobily, kde slouží ke stanovení dojezdu a spotřeby energie. Test lze rozdělit do dvou částí, kdy první část odpovídá městskému provozu, druhá simuluje podmínky mimoměstského provozu. Teplota okolního prostředí při testu je stanovena v rozmezí 20-30°C. Celý průběh cyklu je vidět na obr. 3.3 [9].



Obr. 3.3 NEDC cyklus

3.2.2 WLTP cyklus

Od počátku roku 2018 se používá nová metodika testování s označením WLTP. Ta přináší oproti dříve používaným velké výhody. V porovnání s NEDC test zavádí dynamičtější profil s větší akcelerací, probíhá delší dobu a dosahuje se při něm rychlosti až 130 km/h. Průměrná rychlost je celkově vyšší o 14 km/h než u NEDC. Tato metodika také bere v úvahu výkon vozidla na kilogram a dělí je do třech kategorii. Většina osobních vozidel spadá do třetí kategorie. Teplota je u tohoto testu stanovena na 25 °C. Další výbava vozidla jako je topení, či klimatizace zůstávají stejně jako u předchozích metodik vypnuté. Celý průběh cyklu je možné vidět na obrázku 3.4 [10].



Obr. 3.4 WTLP cyklus 3. kategorie

3.3 Spotřeba systémů vozidla

Důležitou částí energetické bilance elektrického vozidla jsou spotřeby systémů, zejména komfortní spotřeba a je zapotřebí tento výkon pro následující simulace brát v úvahu.

3.3.1 Topení a klimatizace

Největší část odebrané energie vozidla mimo samotný pohon je způsoben topením nebo klimatizací, jejichž výkon dosahuje až několika kilowattů a velkým způsobem ovlivní konečný dojezd. V závislosti na modelu vozidla se maximální výkon topení pohybuje v rozmezí 3-6 kW, střední výkon během jízdy poté záleží na dalších okolnostech, zejména na okolní teplotě. Z dostupných zdrojů bylo zjištěno, že průměrná spotřebovaná energie za hodinu jízdy při teplotě kolem -5 °C a požadované teplotě kabiny 22 °C je 4 kWh. Tato hodnota se zvyšující se teplotou pochopitelně snižuje. Při teplotě 7,5 °C klesá hodnota k 1.5 kWh, nad 15 °C je spotřebovaná energie již jen v desítkách Wh [11]. Pro klimatizaci jsou hodnoty o něco nižší, kdy při požadované teplotě 21 °C, je spotřebovaná energie 2 kWh za hodinu jízdy [11].

3.3.2 Spotřeba ostatních systémů

Spotřeba osvětlení vozidla závisí především na aktuální okolní viditelnosti (jízda ve dne či v noci). Z dat uvedených v [11], je v noci u konvenčních žárovek střední výkon přes 150 W, u vozidla s LED žárovkami zhruba 2-4 krát nižší [8]. Další spotřeby systému jako jsou posilovač řízení a brzd, audiosoustava, stěrače, otevírání okének, vyhřívání oken či sedadel jsou opět velmi odlišné vzhledem k typu, výbavě vozidla a uživateli. Orientační procentuální dopad všech zmíněných systému spotřeby na energii z trakční baterie je uveden v tabulce 3.3 [12]. Pro simulaci je zvolen střední výkon ostatních systému vozidla na 2 kW.

Tab.3.3 Tabulka spotřeb systému vozidla [11][12]

Systém vozidla	*Spotřebovaná energie z trakční baterie*
Topení	*35 %*
Klimatizace	*30 %*
Posilovač řízení	*5 %*
Posilovač brzdění	*5 %*
Ostatní systémy (osvětlení, audio systém, bezpečností systémy atd.)	*5 %*

3.3.3 Počet článků v baterii

Kapacita baterie zvoleného vozu Nissan Leaf je 30 kWh, ale počet sério-paralelních větví baterie není znám. Proto byl proveden krátký výpočet sério-paralelních kombinací se zvoleným článkem, který je modelován v této práci, abychom získali cílové parametry baterie, tj. kapacita, napětí, výkon. Použity jsou následující vztahy:

$$\frac{30000}{360} = 81{,}081\ Ah \qquad (3.7)$$

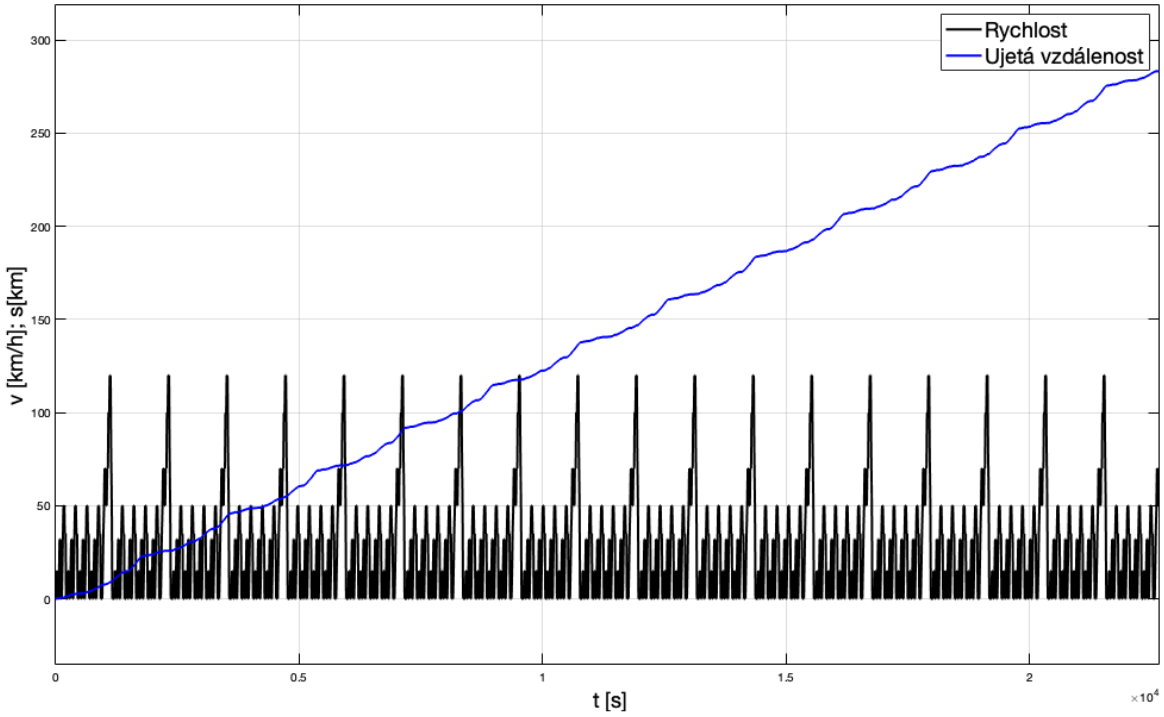
$$\frac{81{,}081}{3{,}3} \cong 25\ \check{c}l\acute{a}nk\mathring{u} \qquad (3.8)$$

3.4 Porovnání dojezdu

Po finálním sestavení modelu bylo provedeno výsledné porovnání dojezdu jízdními cykly NEDC a WLTP při zimní (-5 °C) a letní teplotě (25 °C).

3.4.1 Dojezd při cyklu NEDC

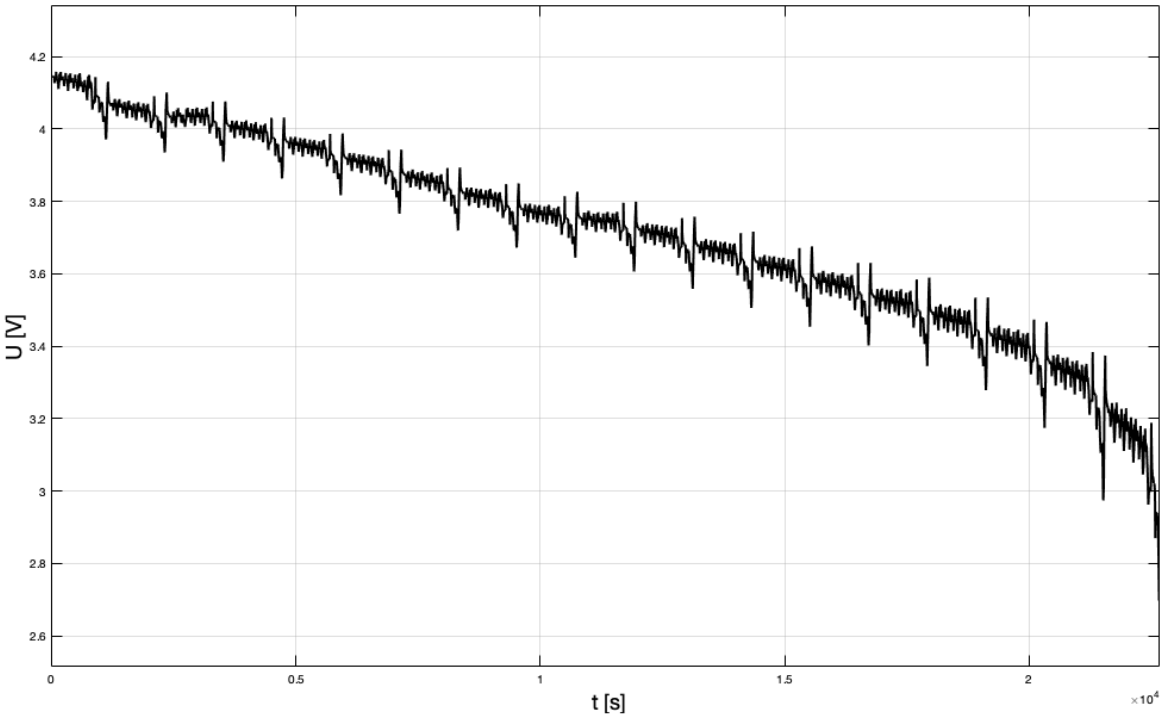
Na následujících obrázcích 3.5 – 3.7 jsou vidět simulační výsledky včetně dojezdu vozu při sledování jízdního cyklu NEDC. Teplota v tomto případě byla nastavena na hodnotu 25 °C. Jak již bylo popsáno v kapitole 3.1.6, velký dopad na ujetou vzdálenost mají vedle pohonu spotřeby jiných systémů. Při této teplotě nebyl brán v úvahu odběr klimatizace, ale pouze výkon ostatních nekomfortních systémů. Na základě rešerše dostupné literatury byl zvolen výkon těchto systémů 2 kW.



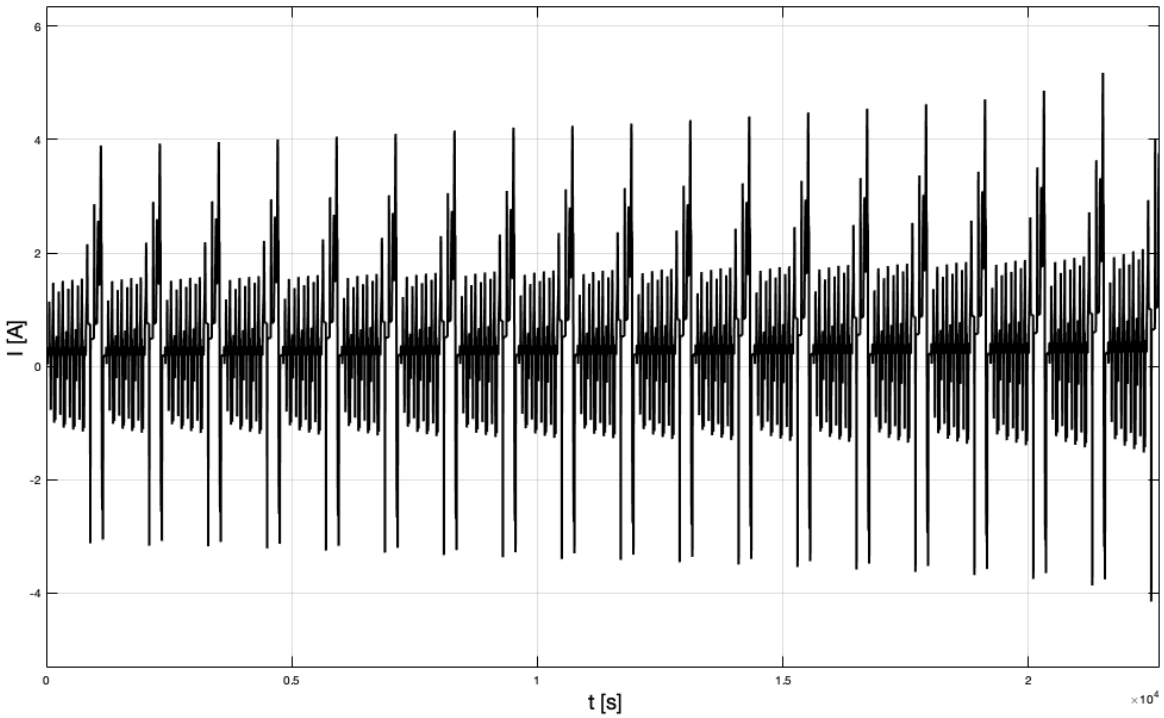
Obr. 3.5 Simulační výsledky cyklu NEDC při 25 °C - rychlost a ujetá vzdálenost

Při těchto podmínkách, jak je možné vidět na obrázku 3.5, baterie poskytuje dojezd (modře) přesahující 280 km, konkrétně 283,5 km. Když porovnáme výsledek s údajem od výrobce (250 km), vychází ujetá vzdálenost o 13,4% větší oproti nominální. Zřejmým důvodem je neznalost několika přesných parametrů, jakými jsou charakteristiky motoru, převodovky, spotřeby systémů vozidla, nepřesnosti v modelu baterie a výrobcem dané

využitelné okno baterie, které bývá často nižší než instalovaná kapacita. Na obrázku 3.6 vidíme průběh napětí článku. Vybíjení bylo zastaveno na hodnotě 90% využitelné kapacity (přibližně 2.7 V), což je hodnota, která je často u elektrických vozidel zvolena z důvodu zvýšení životnosti baterie. Na obrázku 3.7 je zobrazen odebíraný proud z článku.

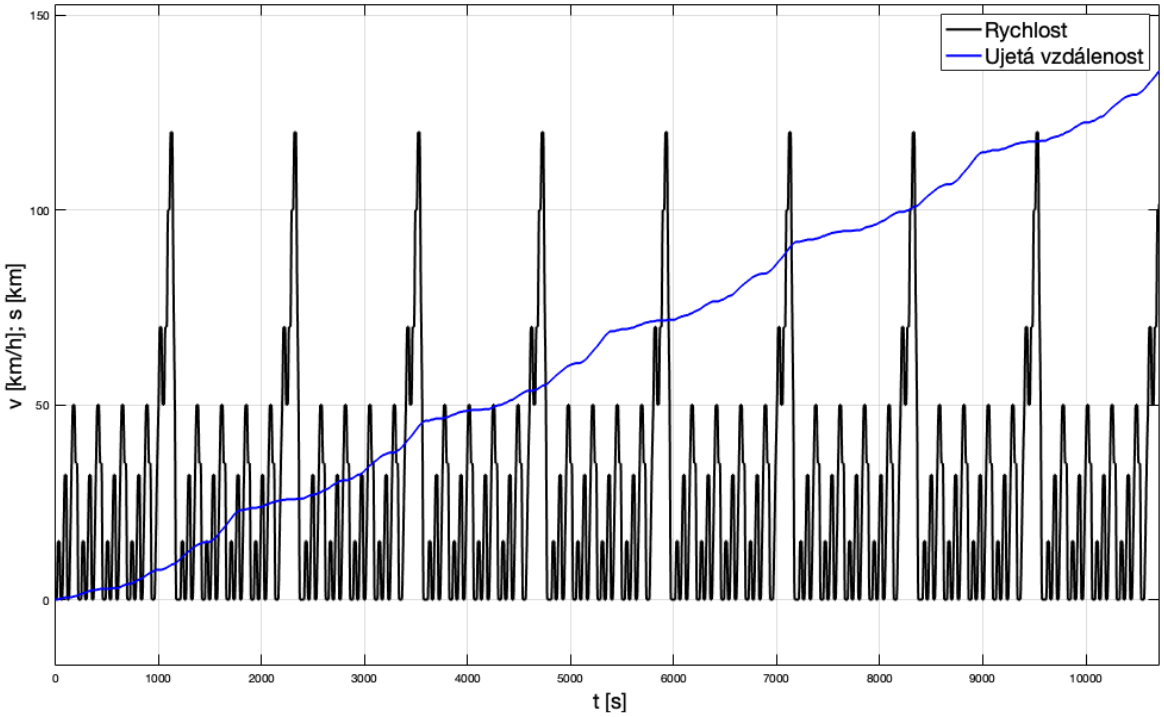


Obr. 3.6 Simulační výsledky cyklu NEDC při 25 °C - napětí článku



Obr. 3.7 Simulační výsledky cyklu NEDC při 25 °C - odebíraný proud z článku

Pro test v zimní období byla teplota nastavena na -5°C. K vlastní spotřebě vozidla byla přičtena komfortní spotřeba zahrnující topení, vyhřívání oken a zrcátek o výkonu 4 kW. Celkový odběr systémů mimo pohon tedy činil 6 kW.



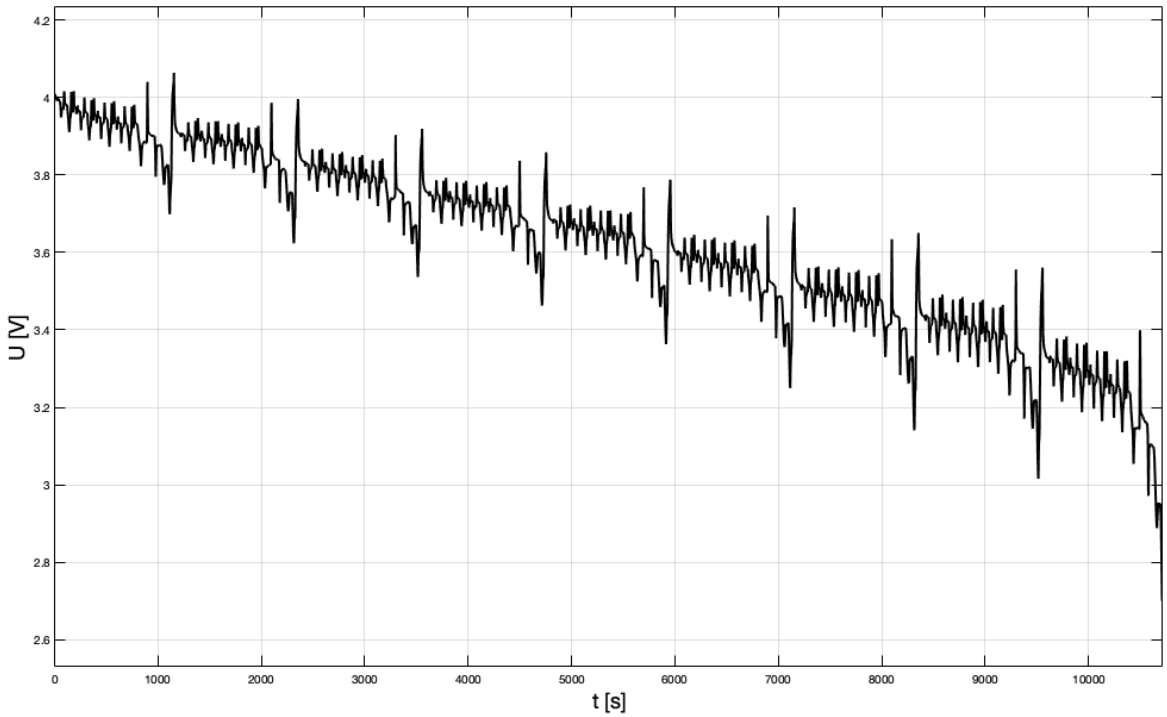
Obr. 3.8 Simulační výsledky cyklu NEDC při -5 °C - rychlost a ujetá vzdálenost

Z obrázku výše můžeme vidět velmi výrazné snížení konečného dojezdu. Využitelná kapacita baterie byla vyčerpána při ujeté vzdálenosti 135,7 km, což je pouze necelých 48% dojezdu při letních teplotách. Pokles je způsoben snížením využitelné kapacity baterie při nízkých teplotách a přídavnou spotřebou vyhřívání interiéru vozidla. V tabulce 3.4 lze vidět přímé porovnání letního a zimního testu.

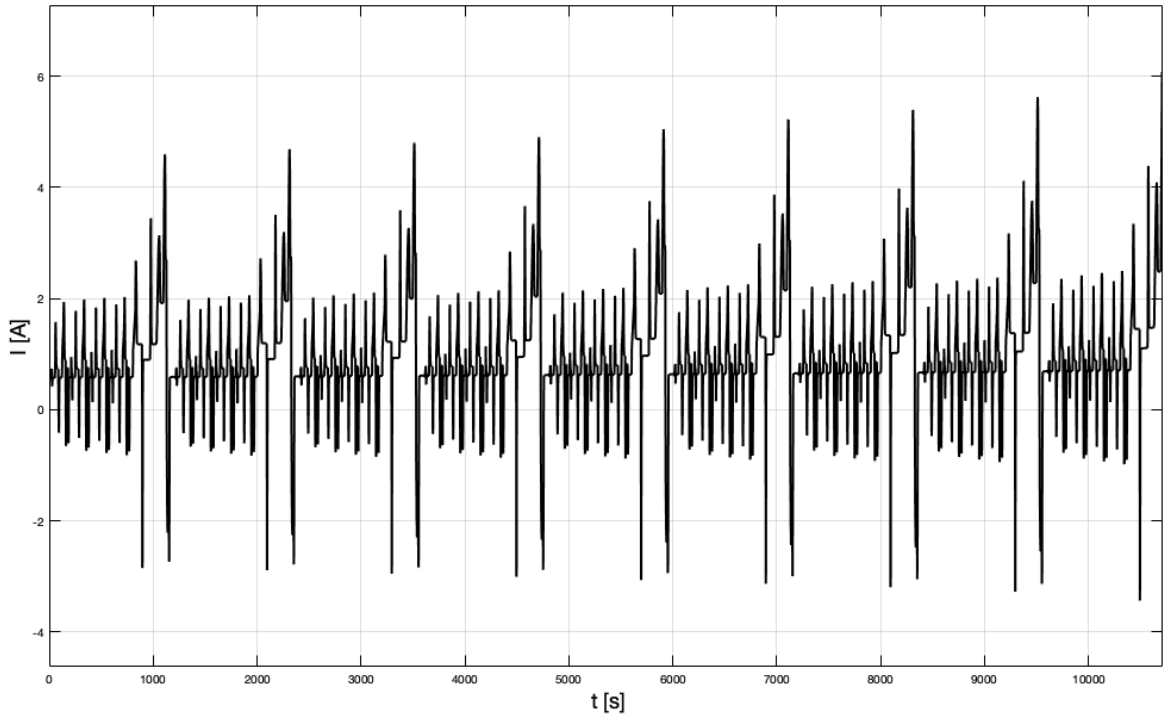
Tab.3.4 Tabulka výsledků simulace při cyklu NEDC

Roční období (teplota)	*Střední výkon spotřeb systémů vozidla*	*Dojezd*
Letní (25 °C)	*2 kW*	*283,5 km (100 %)*
Zimní (-5 °C)	*6 kW*	*135,7 km (47,87 %)*
Hodnota udávaná výrobcem		*250 km*

Na obrázcích 3.9 a 3.10 můžeme vidět napětí článku a odebíraný proud během testu.



Obr. 3.9 Simulační výsledky cyklu NEDC při -5 °C - napětí článku



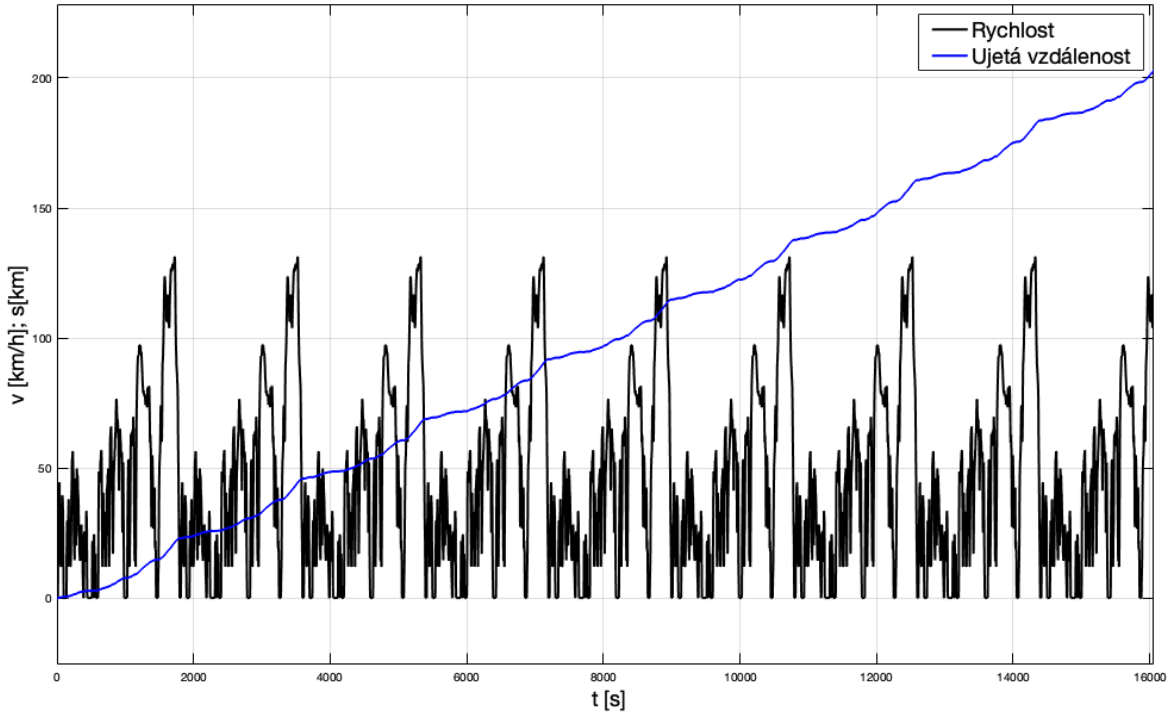
Obr. 3.10 Simulační výsledky cyklu NEDC při -5 °C - odebíraný proud z článku

3.4.2 Dojezd při cyklu WLTP

Testování metodikou WLTP bylo realizováno za stejných teplot jako s NEDC. Dle předpokladů (více v 3.1.5.1) byl očekáván nižší dojezd vozidla, a to z důvodu větší

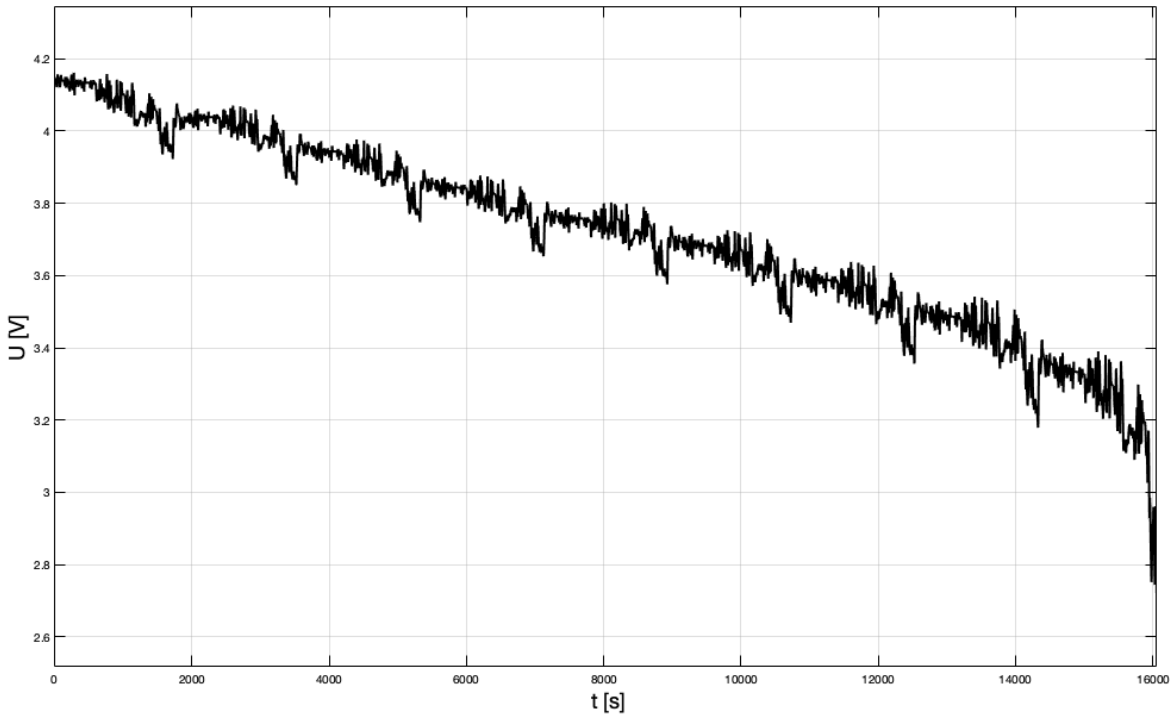
energetické náročnosti cyklu WLTP, který je bližší reálnému dojezdu v běžném provozu. To se také potvrdilo.

Na obrázku 3.11 můžeme vidět, že konec modré křivky značící ujetou vzdálenost je přibližně na hodnotě 200 km. Konkrétně 202,8 km, což je o 29% kratší vzdálenost než při stejných podmínkách u jízdního cyklu NEDC. Z reálných výsledků simulovaného vozu nalezených v [13] a [14] můžeme usoudit, že se tato výsledná simulovaná vzdálenost u cyklu WLTP blíží reálným hodnotám, které se pohybují v závislosti na stylu jízdy okolo 160-200 km, přičemž dojezd touto metodikou výrobcem není testován.

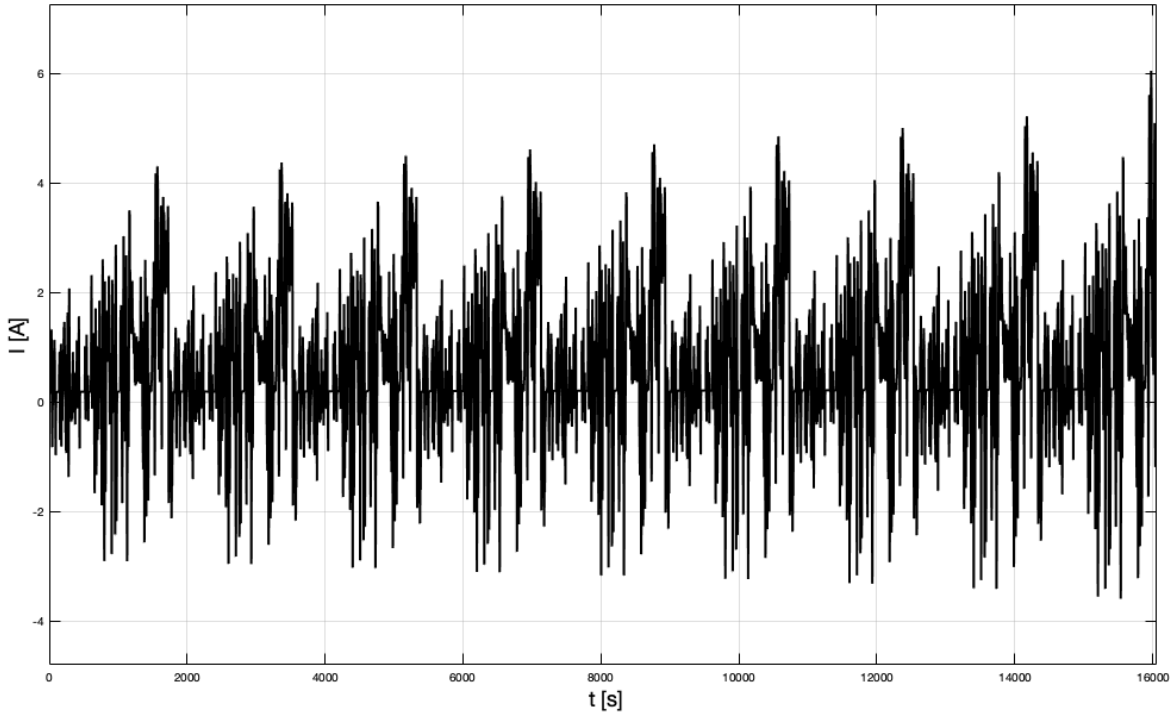


Obr. 3.11 Simulační výsledky cyklu WLTP při 25 °C- rychlost a ujetá vzdálenost

Na obrázcích 3.12 a 3.13 lze vidět napětí článku a odebíraný proud.

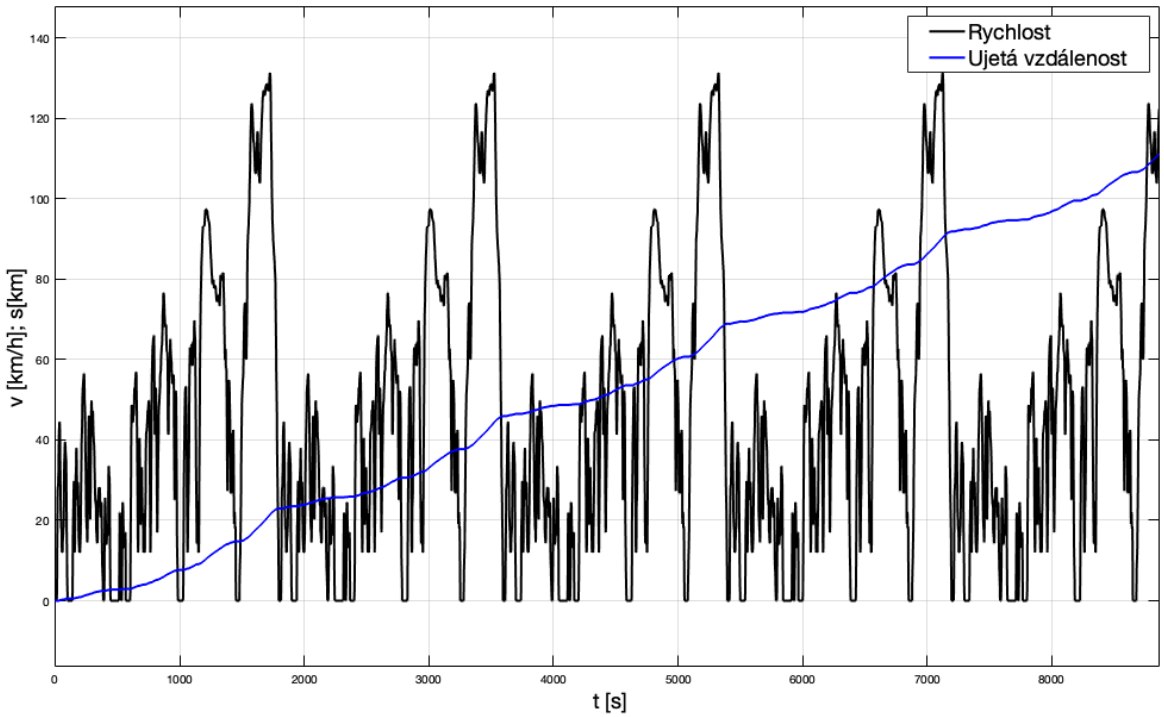


Obr. 3.12 Simulační výsledky cyklu WLTP při 25 °C - napětí článku



Obr. 3.13 Simulační výsledky cyklu WLTP při 25 °C - odebíraný proud z článku

Jak je zobrazeno na obr. 3.14, dojezd při zimním období se podobně jako u cyklu NEDC výrazně snížil. Hodnota 111,1 km je pouze 54,78 % ujeté vzdálenosti v létě. Výsledky jsou v souladu s reálnými hodnotami naměřenými v provozu v zimě, jak lze najít v literatuře [14].

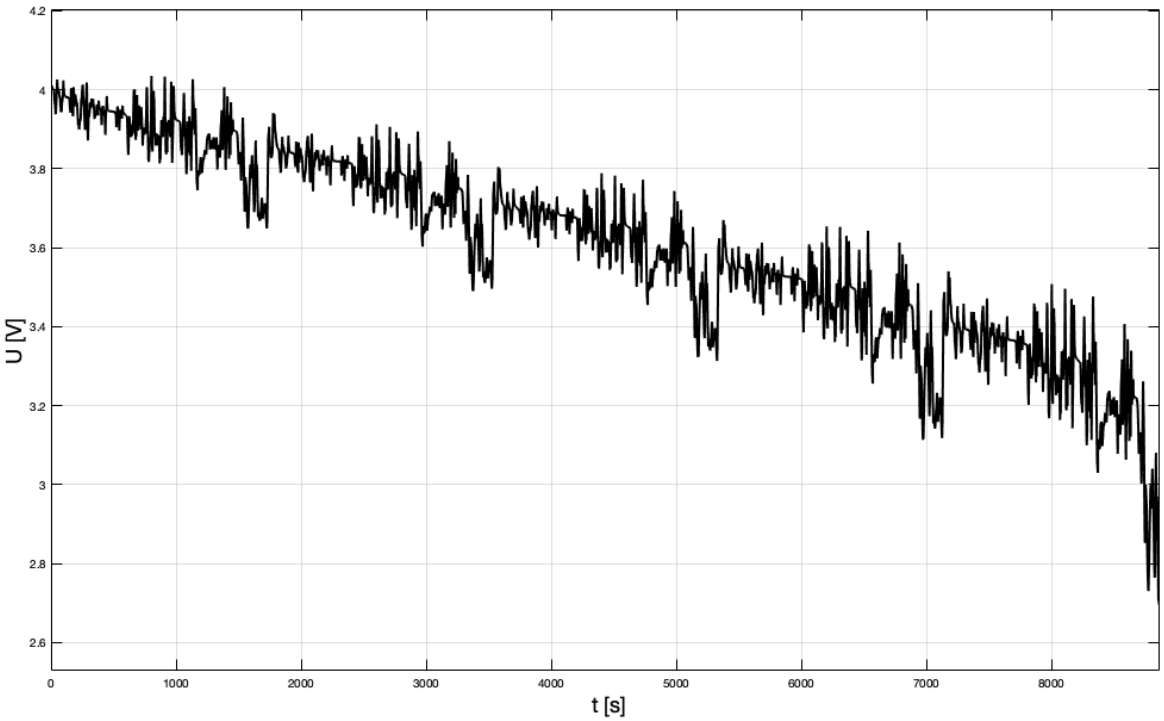


Obr. 3.14 Simulační výsledky cyklu NEDC při -5 °C - rychlost a ujetá vzdálenost

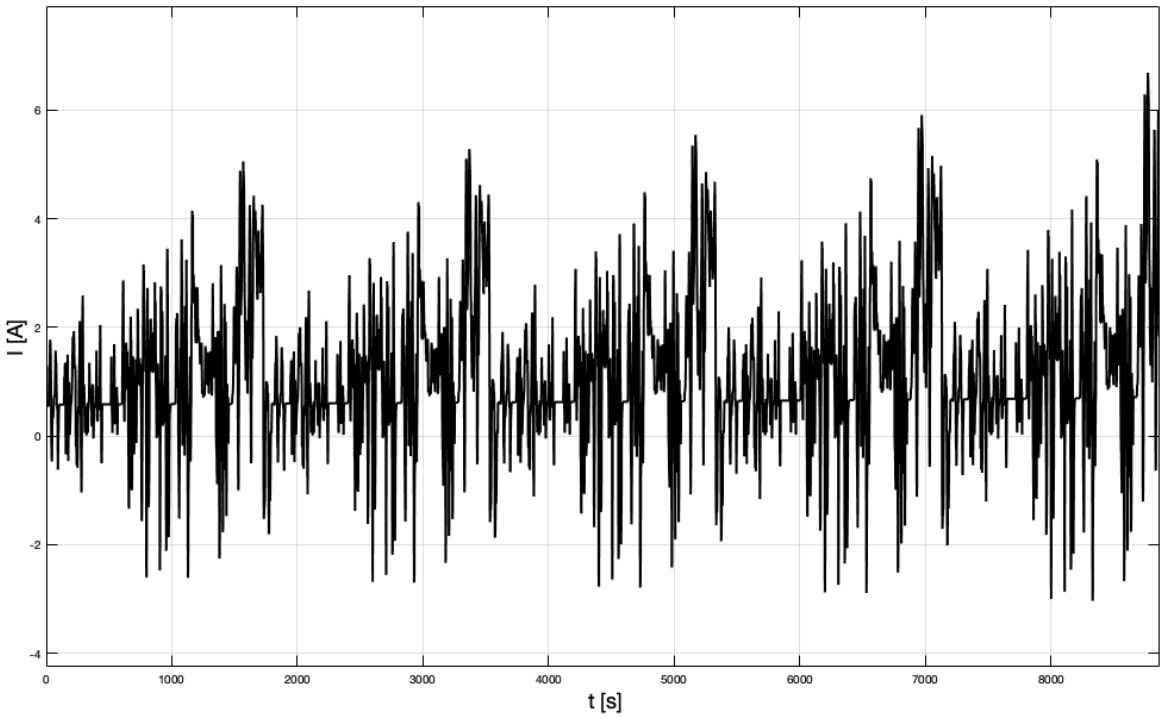
V tabulce 3.5, můžeme vidět přímé porovnání dojezdu při letních a zimních teplotách. Odebíraný proud a napětí článku je na obrázcích umístěných níže.

Tab.3.5 Tabulka výsledků simulace při cyklu WLTP

Roční období (teplota)	*Střední výkon spotřeb systémů vozidla*	*Dojezd*
Letní (25 °C)	*2 kW*	*202,8 km (100 %)*
Zimní (-5 °C)	*6 kW*	*111,1 km (54,78 %)*



Obr. 3.15 Simulační výsledky cyklu WLTP při -5 °C - napětí článku



Obr. 3.16 Simulační výsledky cyklu WLTP při -5 °C - odebíraný proud z článku

3.4.3 Porovnání NEDC a WLTP

Porovnání výsledků simulací provedených na matematickém modelu vozidla s použitím metodiky NEDC a WLTP je uvedeno v Tabulce 3.6.

Tab.3.6 Porovnání výsledků simulací provedených na matematickém modelu vozidla

Roční období (teplota)	*Střední výkon spotřeb systémů vozidla*	*Dojezd NEDC*	*Dojezd WLTP*
Letní (25 °C)	*2 kW*	*283,5 km (100 %)*	*202,8 km (100 %)*
Zimní (-5 °C)	*6 kW*	*135,7 km (47,87 %)*	*111,1 km (54,78 %)*
Hodnota udávaná výrobcem		*250 km*	*-*
Reálné výsledky testů	*Letní období: 160-200 km*		*Zimní Období: 100-120 km*

Z výsledků je patrné, že dojezd stanovený na matematickém modelu je delší než hodnota udávaná výrobcem. To může být způsobeno nepřesnými parametry vozidla v sestaveném modelu. Obdobné rozdíly se dají předpokládat u metodiky WLTP, která nebyla výrobcem aplikována. Při porovnání dojezdu letního a zimního období byl zjištěn pokles u dojezdu vozidla přibližně o 50%. Vzhledem k nalezeným výsledkům z reálného provozu lze říci, že hodnoty dosažené pomocí metodiky WLTP se velmi blíží reálnému dojezdu vozidla.

Závěr

V úvodu této práce jsou nastíněny základní vlastnosti a parametry lithiových baterií a je uvedena krátká rešerše nejběžnějších způsobů modelování trakčních baterií.

Dále byly provedeny série měření lithiového článku při různých teplotách, při konstantním i pulzním zatěžování proudem zátěže o různé velikosti. Z analýzy naměřených dat bylo vyhodnoceno chování lithiových baterií a faktory, které nejvíce ovlivňují výslednou využitelnou kapacitu. Mezi hlavní patří teplota a velikost vybíjecího proudu. Bylo zjištěno, že největší kapacitu má lithiová baterie v okolí teploty 25°C, při navýšení nebo naopak poklesu teploty až pod bod mrazu dochází k jejímu snížení o 15 až 20%. Obdobný vliv je zaznamenán při zvýšení velikosti vybíjecího proudu, kdy při zatěžování nižším proudem lze využít více kapacity než při vybíjení velikostmi blížícími se maximální dovolené hodnotě. Pro modelování baterie byl zvolen Théveninův model 1. řádu s proměnnými parametry. Sestavení modelu proběhlo pomocí softwaru Matlab/Simulink. Byla provedena identifikace parametrů modelu včetně závislosti parametrů na teplotě, vybíjecím proudu či stavu nabití baterie. Model byl verifikován porovnáním s reálnými daty, kdy byla ověřena vyhovující přesnost modelu v celém průběhu vybíjení článku. Výsledkem je dostatečně jednoduchý model, který je možné použít v aplikacích reálného času a aplikovat na širší spektrum lithiových článků. Model je identifikován pro rozsah teploty od -5 °C do 25 °C.

Pro další ověření modelu baterie byl sestaven matematický model vybraného elektrického vozu Nissan Leaf, také v prostředí Matlab/Simulink. Výsledkem spojení s modelem baterie jsme získali data dojezdu vozu s využitím testovacích metodik NEDC a WLTP při rozdílných teplotách. Bylo zjištěno, že dosažitelná vzdálenost vlivem chování baterie (klíčová je změna vnitřního odporu) a přídavné komfortní spotřeby je o polovinu menší než při teplotě pohybující se okolo 25°C.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] Battery Voltage Information – Battery University. Basic to Advanced Battery Information from Battery University [online]. Poslední změna 5.9.2017.[Cit. 15.06.2020]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/confusion_with_voltages

[2] Kapacita (článků nebo baterií) [online]. [Cit. 15.06.2020]. Dostupné z: http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/kapacita+%28článků+nebo+bateri%C3%AD%29

[3] SARIKURT, T., M. CEYLAN a A. BALIKÇI. A hybrid battery model and state of health estimation method for lithium-ion batteries [online]. 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/6850598

[4] WILLIAMSON, Sheldon S. Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. 2013. ISBN 978-1461477105.

[5] JONGERDEN, M.R a B.R HAVERKORT. Which battery model to use? [online]. 2009 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1049. Dostupné z: https://doi.org/10.1049/iet-sen.2009.0001

[6] SALDAÑA, Gaizka, José Ignacio SAN MARTÍN, Inmaculada ZAMORA, Francisco Javier ASENSIO a Oier OÑEDERRA. Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation [online]. 2019 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.3390. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/en12142750

[7] 2017 Nissan Leaf SL - Specifications. EVSpecifications - Electric vehicle specifications, electric car news, EV comparisons [online]. 2020 evspecifications.com [cit. 15.06.2020]. Dostupné z: https://www.evspecifications.com/en/model/7a2813

[8] STATON, Dr David a Dr James GOSS. Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://docplayer.net/64747945-Open-source-electric-motor-models-for-commercial-ev-hybrid-traction-motors-dr-david-staton-dr-james-goss.html

[9] NICOLAS, Romain. The different driving cycles [online]. 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/

[10] WLTP: MÁTE JASNO V NOVÉM ZPŮSOBU MĚŘENÍ EMISÍ? [online]. 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.vvautomotive.cz/WLTP-MATE-JASNO-V-NOVEM-ZPUSOBU-MERENI-EMISI/

[11] EVTIMOV, Ivan, Rosen IVANOV a Milen SAPUNDJIEV. Energy consumption of auxiliary systems of electric cars [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1051. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/47/matecconf_bultrans2017_06002/matecconf_bultrans2017_06002.html?mb=0

[12] MIO, Takumi, Yukihiro KOMATSUBARA, Naoki OHMI, et al. Auxiliary Power Supply System for Electric Power Steering (EPS) and High-Heat-Resistant Lithium-Ion Capacitor [online]. [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.3390. Dostupné z: https://www.mdpi.com/2032-6653/10/2/27

[13] JEDLIČKA, MARTIN. Test auta: Nissan Leaf aneb jak se žije s elektromobilem [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.forum24.cz/lifestyle/2017/08/31/test-auta-nissan-leaf-aneb-jak-se-zije-s-elektromobilem/

[14] DITTRICH, Lukáš. Elektrický srovnávací test: Hyundai Ioniq Electric vs. BMW i3 94 Ah vs. Nissan Leaf 30 kWh [online]. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://autobible.euro.cz/elektricky-srovnavaci-test-hyundai-ioniq-electric-vs-bmw-i3-94-ah-vs-nissan-leaf-30-kwh/

[15] Peukert's Law | A Nerd's Attempt to Explain Battery Capacity [online]. 2019 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.batterystuff.com/kb/tools/peukert-s-law-a-nerds-attempt-to-explain-battery-capacity.html