



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# TVORBA DIGITÁLNĚHO DVOJČAŤA VOZIDLA Z DÁT ZÍSKANÝCH POČAS JAZDNÝCH SKÚŠOK

A VEHICLE DIGITAL TWIN CREATION FROM DATA ACQUIRED DURING DRIVING TESTS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Polnický

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ušiak

BRNO 2024





# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Vít Polnický**  
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Ušiak**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Tvorba digitálního dvojčata vozidla z dat získaných počas jazdných skúšok**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V dnešnej dobe je investované nemalé úsilie automobiliek do tvorby virtuálnych prototypov alebo digitálnych dvojčiat. Takéto modely sú schopné zefektívniť vývoj vozidiel v koncepcnej fáze, ale tiež slúžia pre rôzne porovnávacie štúdie pri vylepšovaní jednotlivých komponentov. V prípade modelov pohonných jednotiek je nutné získať charakteristiky jednotlivých komponentov. V určitých špecifických prípadoch ale nie je možné získať tieto charakteristiky jednotlivo. Cieľom práce je preto preskúmať možnosti vytvorenia digitálneho dvojčata pomocou veľkej série dat získaných počas jazdných skúšok.

### **Ciele diplomové práce:**

Vytvorenie rešerše odbornými článkami zaoberajúcimi sa modelovaním pozdĺžnej dynamiky vozidla a hnacieho ústrojenstva najmä na základe dat zozbieraných z jazdných skúšok.

Spracovanie dat z jazdných skúšok s reálnym vozidlom za účelom získania vstupných parametrov do simulačného modelu pozdĺžnej dynamiky vozidla a hnacieho ústrojenstva.

Vytvorenie modelu pozdĺžnej dynamiky batériového elektrického vozidla v prostredí GT-SUITE. Pričom daný model bude na vhodnej úrovni detailu pre vytvorenie digitálneho dvojčata reálneho vozidla pomocou dat zozbieraných z jazdných skúšok.

Validácia vytvoreného simulačného modelu na základe meraní.

### **Seznam doporučené literatury:**

VLK,F. Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-238-5273-6, Nakladatelství VLK, Brno 2000.

Virtual Reality Toolbox, User's Manual, Humusoft, Praha 2000. ISBN 80-7080-373-8.

LINK, A., O'CONNOR, A., SCOTT, T. Battery technology for electric vehicles: public science and private innovation. New York, NY: Swales&Willis, 2015. ISBN 978-1-138-81110-2.

BERETTA, Joseph. Automotive electricity: electric drives. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010.

ISBN 978--84821-095-0.

HUGHES, Austin a Bill DRURY. Electric Motors and Drives. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2013. ISBN 0080983324.

BOLDEA, Ion a Syed A NASAR. Electric Drives. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 9781498748209. Dostupné z: doi:10.1201/9781315368573.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá modelováním podélné dynamiky vozidla na základě naměřených dat během jízd s elektrickým vozidlem. Kromě tvorby modelu v softwaru GT-SUITE se práce věnuje zpracování signálů z řídicích jednotek vozidla. Vybrané signály slouží pro tvorbu účinnostní mapy, vnější otáčkové charakteristiky elektromotoru a v neposlední řadě i charakteristik baterie vozidla. Pro určení OCV a vnitřního odporu baterie byl sestaven model baterie v softwaru MATLAB Simulink, kde byly pomocí aplikace Parameter Estimator odhadnuty požadované veličiny. Pro simulaci v prostředí GT-SUITE byly zpracovány z naměřených dat rychlostní profily. Validace modelu bylo dosaženo porovnáním výsledků s naměřenými hodnotami.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální dvojče, podélná dynamika vozidla, elektrické vozidlo, zpracování signálů, simulace GT-SUITE

## ABSTRACT

The thesis deals with the modelling of the longitudinal dynamics of the vehicle based on the measured data during driving with a electric vehicle. In addition to the creation of the model in GT-SUITE software, the thesis deals with the processing of signals from the vehicle control units. The selected signals are used to generate the efficiency map, the torque speed characteristics of the electric motor and, last but not least, the characteristics of the vehicle battery. To determine the OCV and internal resistance of the battery, a battery model was built in MATLAB Simulink software, where the required quantities were estimated using Parameter Estimator. For simulation in GT-SUITE environment, speed profiles were processed from the measured data. Validation of the model was achieved by comparing the results with measured values.

## KEYWORDS

Digital twin, longitudinal vehicle dynamics, electric vehicle, signal processing, GT-SUITE simulation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLNICKÝ, V. *Tvorba digitálneho dvojčata vozidla z dát získaných počas jazdných skúšok* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157877>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Michal Ušiak.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Ušiaka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Vít Polnický

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce za ochotu, vstřícnost a poskytnuté rady během zpracovávání závěrečné práce. Dále děkuji své rodině a přátelům za projevenou podporu během celého studia.

# OBSAH

Úvod.....	11
<b>1 Koncept digitálního dvojčete .....</b>	<b>12</b>
1.1 Vznik a definice digitálního dvojčete.....	12
1.2 Možné úrovně digitalizace.....	13
1.2.1 Digitální model.....	13
1.2.2 Digitální stín.....	14
1.2.3 Digitální dvojče.....	14
1.3 Technologie digitálních dvojčat.....	14
1.3.1 Internet věcí.....	14
1.3.2 Cloud computing.....	15
1.3.3 Umělá inteligence.....	15
1.3.4 Rozšířená realita.....	15
<b>2 Digitální dvojče a elektrické vozidlo .....</b>	<b>17</b>
2.1 Automobilový průmysl a digitální dvojče.....	17
2.2 Strategie pro zavádění digitálních dvojčat.....	18
2.2.1 Tvorba modelu.....	18
2.2.2 Virtuální sensory.....	19
2.2.3 Upravení parametrů.....	19
2.3 Baterie a jejich management.....	19
<b>3 Podélná dynamika vozidla .....</b>	<b>22</b>
3.1 Aerodynamický odpor vozidla.....	23
3.2 Valivý odpor.....	26
3.3 Odpor stoupání.....	27
3.4 Celková hnací síla a ztráty v hnacím ústrojí.....	27
<b>4 Současný stav poznání.....</b>	<b>30</b>
4.1 Porovnání fyzikálně založených a datově řízených modelů v reálných jízdních podmínkách.....	30
4.1.1 Fyzikální model.....	31
4.1.2 Dynamický lineární model.....	32
4.1.3 Model umělé neuronové sítě.....	33
4.1.4 Výsledky a porovnání modelů.....	33
4.2 Modelování digitálního dvojčete elektrického měniče.....	35
4.2.1 Testovací zařízení.....	35
4.2.2 Tvorba modelu měniče.....	36
4.2.3 Verifikace modelu.....	37
4.3 Postup návrhu elektrického pohonného systému na základě naměřených dat.....	37
4.3.1 Postup návrhu hnacího ústrojí.....	38
4.3.2 Potřebné rovnice a veličiny.....	38
4.3.3 Tvorba jízdního profilu.....	39
4.3.4 Sestavení provozních zátěží.....	40
<b>5 Zpracování dat.....</b>	<b>42</b>
5.1 Měřicí soustava ve vozidle.....	42

---

5.2	Vybrané naměřené záznamy .....	43
5.3	Elektromotor .....	43
5.4	Baterie .....	48
<b>6</b>	<b>Model elektrického vozidla v GT-SUITE .....</b>	<b>56</b>
6.1	Model elektromotoru.....	56
6.2	Model baterie .....	57
6.3	Vozidlo a jeho parametry .....	59
6.4	Řidič .....	60
6.5	Řízení motoru.....	61
6.6	Ochrana baterie .....	62
<b>7</b>	<b>Porovnání výsledků.....</b>	<b>63</b>
7.1	Trasa č.1 .....	63
7.2	Trasa č.2 .....	66
7.3	Trasa č.3 .....	68
7.4	Zhodnocení.....	71
<b>Závěr .....</b>	<b>.....</b>	<b>74</b>
<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>.....</b>	<b>76</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>.....</b>	<b>81</b>



## ÚVOD

V dnešní době se technologie posunují velmi dynamickým tempem dopředu. Velký pokrok a popularitu zaznamenala za posledních několik let umělá inteligence jež pronikla i do automobilového průmyslu. Dnes existuje již mnoho výrobců, kteří implementují prvky umělé inteligence do svých vozidel nejenom za účelem navýšení komfortu pro jejich uživatele. Poměrně velická pozornost se upřela i k technologii digitálních dvojčat. Jedná se o velmi rozsáhlou problematiku, kdy je cílem vytvořit virtuální systém, který je obrazem reálného produktu, či systému. Digitální dvojče lze využít při vývoji a návrhu nových produktů, optimalizaci procesů či pro predikci kritických stavů.

Jedním z největších celosvětových projektů v oblasti digitálního dvojčete je vytvoření virtuálního města Šanghaj. Tento projekt by měl pomoci při řízení veškeré dopravy ve městě, plánování nových staveb či ochraně před povodněmi. Snaha o vytvoření digitálního dvojčete probíhá i na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Zde se jedná o digitální dvojče elektrického vozidla.

Tématem tvorby digitálního dvojčete se zabývá i tato práce. Konkrétně je cílem stanovit, zda je možné vytvořit funkční model podélné dynamiky elektrického vozidla na základě naměřených jízdních dat. Práce je tedy z větší části zaměřena na uvedení postupu při výběru a zpracování signálů z řídicích jednotek vozidla na jejichž základě jsou získávány potřebné parametry pro vytvoření odpovídajícího modelu v softwaru GT-SUITE a provedení simulací pro porovnání výsledků a validaci modelu.

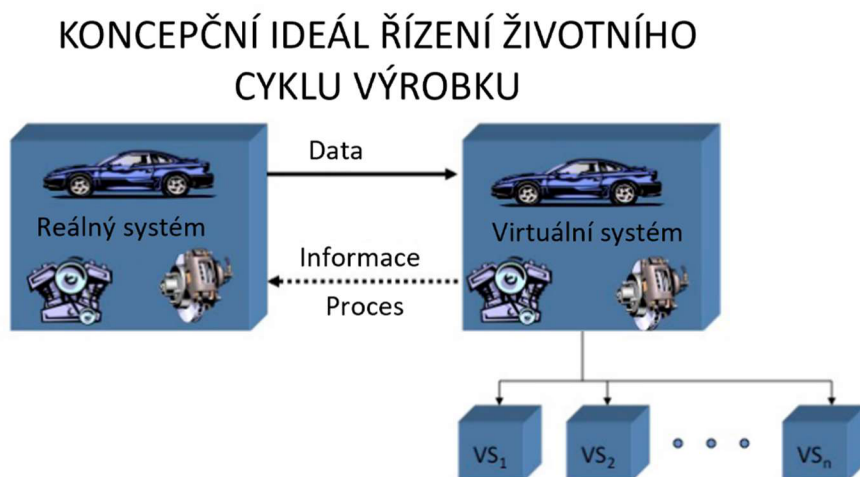
# 1 KONCEPT DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Rychlý vývoj technologií a digitalizace se staly klíčovými prvky moderního průmyslu 21. století. Změny v oblasti informačních technologií, průmyslového inženýrství, automatizace a obecně k přístupu sbírání a zpracovávání dat přináší nové možnosti a výzvy. Mezi významné koncepty digitálních technologií lze zařadit například umělou inteligenci (AI), rozšířenou realitu (XR), tzv. „Internet věcí“ (IoT) nebo digitální dvojče (DD). Využití těchto inovativních přístupů přináší pozitivní vliv na efektivitu, spolehlivost, rychlost rozvoje a ziskovost napříč všemi oblastmi průmyslu i mimo ně.

## 1.1 VZNIK A DEFINICE DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Pozornost a snaha o vytváření virtuálních dvojčat je převážně záležitostí posledních 10ti let, nicméně už ve druhé polovině 20. století se vyskytl případ, který vzdáleně splňoval některé náležitosti DD. V roce 1970 došlo při vesmírném letu Apollo 13 k výbuchu kyslíkové nádrže a poškození servisního modulu, jehož funkčnost byla zásadní pro úspěšné splnění mise [1]. Klíčovým prvkem pro opravu byla fyzická kopie modulu, kterou NASA disponovala na své základně v Houstonu. Ta posloužila pro věrohodnou simulaci provozního stavu poškozené lodi a nalezení řešení pro její opravu[2].

Nicméně jako autor konceptu Digitálního dvojčete se nejčastěji považuje profesor Michael Greives [3], který jej nepřímo představil na prezentaci s názvem Řízení životního cyklu výrobku (PLM) v roce 2002 na Michiganské univerzitě. Autor uvedl pojem „Conceptual Ideal of PLM“ (viz. Obr. 1), který je možné přeložit jako Konceptní ideál PLM, a jeho podstata spočívá v myšlence, že digitální informační systém vytvořený na základě reálného systému může existovat jako samostatná entita, která je propojena s tímto reálným systémem po celou dobu jeho životního cyklu [3].



Obr. 1 Konceptní ideál PLM [3]

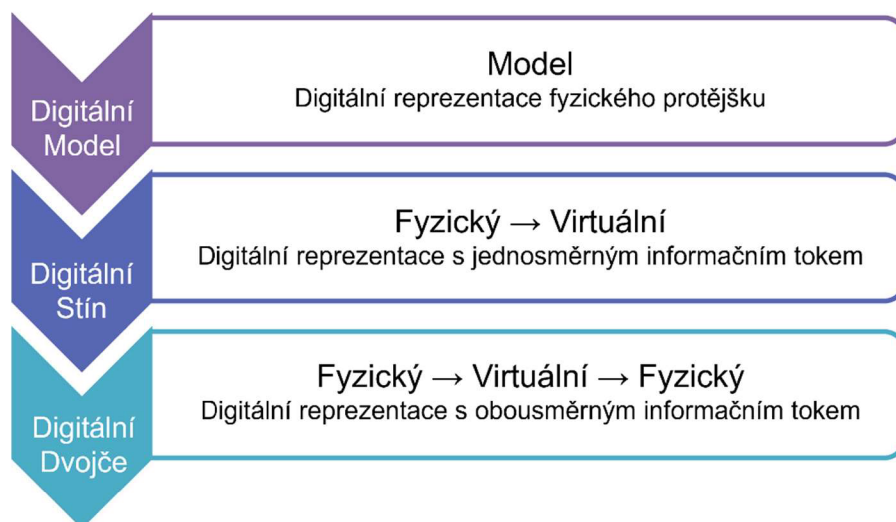
V jednotlivých pracích zabývajících se DD se autoři odlišují v interpretaci definice DD. Odlišnost vzniká většinou z důvodu charakteru práce a oblastí, ve které je DD vyvíjeno [4][5]. V roce

2010 definovala NASA DD jako multifyzikální víceúrovňovou simulaci v reálném čase pro predikci chyb na reálném vozidle [6]. Další autoři popisují DD jako kombinaci fyzikálního a virtuálního systému, kde změna v jednom systému je reflektována v druhém a naopak [4]. Další zdroje uvádějí DD jako digitální propojení produktu či procesu s virtuální reprezentací s funkčním výstupem [5][7].

Obecně by se tedy dalo Digitální dvojče definovat jako virtuální reprezentaci fyzických objektů, procesů či systémů, která využívá data z fyzického protějšku v reálném čase. Na základě vstupních dat provádí analýzy, učí se, vyhodnocuje a zpětně koriguje reálně existující protějšek. S pokročilými algoritmy, simulačními modely a obsáhlými daty je možné, aby DD predikovalo budoucí stavy fyzického protějšku[8][9].

## 1.2 MOŽNÉ ÚROVNĚ DIGITALIZACE

Jelikož se stále neustálila jednoznačná definice, je poměrně obtížné rozlišit hranice mezi úrovněmi digitalizace a může docházet k mylnému označování modelů za DD. Společně s tvorbou DD vzniklo v roce 2016 označení Digitální Stín (DS), který tvoří mezistupeň mezi pouhým digitálním modelem a DD. Přehledné rozdělení digitalizace na 3 úrovně je zobrazeno na Obr. 2 [9].



Obr. 2 Úrovně digitalizace [9]

### 1.2.1 DIGITÁLNÍ MODEL

Digitální model je virtuální produkt nebo systém, který je vytvořený pro účely simulací a analýz. DM může být kopií již existujícího produktu či naopak slouží jako podklad pro jeho vytvoření. DM nepracuje s aktuálními daty a vzájemně se neovlivňuje s fyzickým modelem. Většinou se jedná o 3D model s příslušnou geometrií a materiálovými vlastnostmi, ale v určitých případech je dostatečný pouze 2D model [10].

### 1.2.2 DIGITÁLNÍ STÍN

Prostřední úroveň digitalizace je označována jako Digitální stín (DS). Na rozdíl od DM zde dochází k interakci mezi digitálním a fyzickým modelem. Jedná se však o jednosměrný datový tok, kdy je DS řízený živými daty z fyzického protějšku. Ačkoliv DS data vyhodnocuje, není opatřen zpětnou vazbou, pomocí které by přímo ovlivnil pracovní podmínky a nastavení objektu [4][10].

### 1.2.3 DIGITÁLNÍ DVOJČE

Na pomyslném vrcholu pyramidy je digitální dvojče. Jedná se o obousměrný datový tok mezi fyzickým a virtuálním modelem, který zajišťuje vzájemné propojení a interakci obou modelů. Při změně provedené na fyzickém modelu dojde k analýze, vyhodnocení a následně k optimalizaci pracovního chodu objektu podle určených kritérií. DD provádí zpětnou vazbu zcela samostatně a automaticky [4].

## 1.3 TECHNOLOGIE DIGITÁLNÍCH DVOJČAT

Pro vytvoření funkčního DD je zásadní získávání a práce s daty, vytváření modelů a systémů, vyhodnocování a aplikace výsledků. Kromě klasických postupů a nástrojů jsou často využívány moderní technologie jako je Internet věcí (IoT), umělá inteligence (AI), rozšířená realita (XR) a Cloud computing. Jednotlivé technologie budou podrobněji představeny v následujících podkapitolách [9].

### 1.3.1 INTERNET VĚCÍ

Označení Internet věcí odkazuje na datovou síť, která umožňuje vzájemné propojení mezi tzv. „smart things“, jako jsou počítače, telefony, senzory, vozidla a obecně všechny zařízení, které mají připojení k internetu [9]. Zásadní je využití bezdrátového propojení mezi jednotlivými zařízeními, ačkoliv je signál vystaven většímu riziku zkreslení. Při vzájemném toku informací je také nutné data někde shromažďovat a většina „smart things“ jsou značně omezeny svojí kapacitou. V dnešní době jsou často samotná zařízení napojena na servery a cloudy. Se stále narůstajícím počtem zařízení a množstvím dat bude problém stále komplexnější a je proto vyvíjena snaha o vytvoření efektivního řešení pro vzájemnou konektivitu napříč všemi zařízeními [11]. Podle typu vzájemné interakce lze vyčlenit 3 způsoby:

- stroj-stroj (Machine to Machine),
- člověk-stroj (Human Machine Interface)
- a člověk-člověk (People to People) [9].

IoT slouží jako primární zdroj dat pro samotnou tvorbu DD. Digitální dvojčata mohou následně z IoT čerpat potřebná data v reálném čase z mnoha zdrojů a zpětně komunikovat s potřebnými zařízeními pro řízení fyzického protějšku [9].

### 1.3.2 CLOUD COMPUTING

Technologie Cloud computing poskytuje hostované služby přes internetové propojení s datovými centry. Centra umožňují ukládat data a provádět výpočty přes vzdálený přístup, čímž snižují náklady spojené s investicemi na opatření výpočetního hardwaru a uložení. Další výhodou je snadný přístup na cloud k datům téměř odkudkoliv. Na druhou stranu je využívání těchto služeb spojeno s možným rizikem kybernetických útoků a únikem dat [9][12]. V případě digitálních dvojčat dovoluje Cloud computing provádět simulace a analýzy v požadovaném čase a zasáhnout včas v případě potřeby do řízení fyzického protějšku [12].

### 1.3.3 UMĚLÁ INTELIGENCE

Další technologie, která je velmi často skloňovaná i v široké veřejnosti, je Umělá inteligence (Artificial Intelligence). Jedná se o odvětví informačních technologií, které tvoří systémy schopné provádět úkoly, které vyžadují lidskou inteligenci. Využívá k tomu robotiku a algoritmy, které napodobují procesy lidského myšlení a rozhodování. AI také zahrnuje rozpoznávání obrazů a jazyka [9]. AI obdobně jako DD není jednoznačně definovaná, nicméně se rozděluje na 2 typy [13]:

- Omezená umělá inteligence (Artificial narrow intelligence, také ANI),
- Obecná umělá inteligence (Artificial general intelligence, také AGI).

Omezená umělá inteligence (ANI), někdy označovaná jako Slabá AI (Weak AI), je vymezena pouze na specifikované úkoly ve vymezené oblasti a není schopna porozumět a orientovat se mimo tuto oblast. Rozsah jejího fungování je omezen předem naprogramovanými algoritmy. Jedná se například o hlasové asistenty, chatboty či algoritmy pro doporučování obsahu v aplikacích a webových stránkách[14].

Obecná umělá inteligence (AGI), někdy označovaná jako Silná AI (Strong AI), již plně věrohodně napodobuje inteligenci a chování lidské bytosti. AGI je schopna porozumět, učit se a vykonávat rozmanité úkoly ve všech oblastech působení. Není tedy omezena na úzkou oblast a při přechodu do neznámé domény se adaptuje a učí jednotlivým úkonům, podobně jako lidský mozek. V současnosti zatím neexistuje takto plně vyvinutý a rozsáhlý systém [13][14].

Umělá inteligence přináší pokročilý analytický nástroj pro automatické analyzování dat. Při použití u DD dojde k časové úspoře, ale při načtení velkého množství dat je AI schopna predikovat výsledky a sama navrhnout možná doporučení pro optimalizaci procesu [9].

### 1.3.4 ROZŠÍŘENÁ REALITA

Extended Reality (XR), neboli rozšířená realita, je hromadné označení pro:

- Rozšířenou realitu (Augmented reality, také AR),
- Virtuální realitu (Virtual reality, také VR)
- a Smíšenou realitu (Mixed reality, také MR) [9].

Rozšířená realita (AR) je zobrazení reálného světa rozšířené o virtuální prvky. Virtuální prvky či objekty mohou realitu překrývat nebo je pouze doplňovat za účelem rozšíření množství informací. AR je charakterizována:

- propojením virtuálního a reálné prostředí,
- interakcí v reálném čase
- a odehrává se v 3D prostoru[15].

Virtuální realita (VR) je na rozdíl od AR zcela digitální. Cílem je simulování věrného zážitku z virtuálního prostředí pomocí počítačově vytvořených vizuálních, zvukových či haptických vjemů. Dané prostředí může být buď kopie reálného či zcela nově vytvořené [16].

## 2 DIGITÁLNÍ DVOJČE A ELEKTRICKÉ VOZIDLO

Tato kapitola je převážně zaměřena na využití technologie Digitálních dvojčat společně s elektrickým vozidlem (Electric vehicle, také EV), ale představuje i náhled do zapojení DD obecně v automobilovém průmyslu. Jelikož u EV je velmi důležitá oblast elektrického pohonu a managementu baterií, bude část kapitoly zaměřena na popis vhodné přístupu pro tvorbu DD v těchto oblastech.

### 2.1 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL A DIGITÁLNÍ DVOJČE

Je obecně známo, že automobilový průmysl je velmi rozsáhlý a pro konkurenci schopnost je nutné udržovat krok s nejnovějšími technologiemi. S pokročilými možnostmi v oblasti technologií se dnes čím dál častěji se zabudovanými inteligentními řídicími systémy ve vozidlech, které napomáhají ke zvýšení účinnosti, úspoře energie či navýšení komfortu pro řidiče a pasažéry. Mezi takové systémy lze zařadit adaptivní automaty s upraveným jízdním stylem s ohledem na plynulost jízdy, úsporu energie a regenerativní brzdění. Další možností je zapojení prediktivních algoritmů pro řízení elektrických motorů s cílem minimalizace potřebné elektrické energie pro jeho pohon. Mezi systémy zvyšující komfort řízení patří například udržování vozidla v jízdním pruhu. Ačkoliv samotné systémy nemusí přímo využívat technologii DD, jejich vývoj byl značně náročný v mnoho aspektech, a proto jeho spojení s optimalizací pomocí prediktivního testování technologií DD je namístě. Oblasti využívající digitální dvojčata je možné vidět na Obr. 3[17].



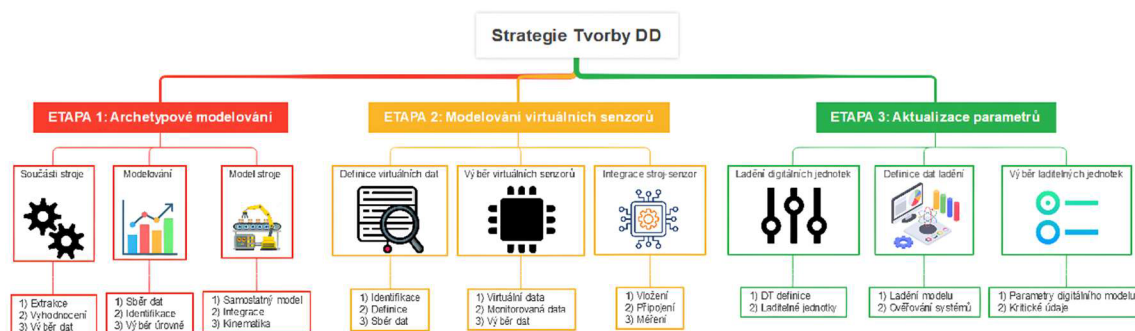
Obr. 3 Aplikace Digitálních dvojčat v automobilovém průmyslu – upraveno podle [18]



Samotná EV jsou na základě jejich způsobu řízení pohonného systému vhodná pro tvorbu jejich virtuálních protějšků. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, pro DD je nutné mít přístup k velkému množství dat a ideálně po celou dobu životního cyklu elektrického vozidla. Virtuální model tedy obsahuje 3D CAD data samotného vozidla, či jeho podsystémů, charakteristiky aerodynamických a dynamických modelů, tepelné či chemické charakteristiky pro oblast bateriových článků a vodičů. Dále také průběhy vybraných veličin při provozu vozidla a údaje o okolním prostředí [17].

## 2.2 STRATEGIE PRO ZAVÁDĚNÍ DIGITÁLNÍCH DVOJČAT

Při tvorbě virtuálního modelu je nutné si nejprve stanovit charakter samotného modelu a očekávané výstupy. Rozsah celého modelu se také odvíjí od finančních a časových prostředků. Pro zjednodušení jsou navrženy tři fáze postupu modelování [18]. První fáze zahrnuje kinematické a dynamické charakteristiky modelu a jeho samotnou tvorbu, druhá fáze se zaměřuje na tvorbu digitálních snímačů a generaci jejich generaci dat v průběhu simulace, a nakonec v poslední fázi je kladen důraz na výstupy v podobě nastavitelných parametrů, které slouží k validaci digitálního modelu vůči naměřeným datům [18].



Obr. 4 Fáze pro tvorbu Digitálních dvojčat [18]

### 2.2.1 TVORBA MODELU

Z hlediska modelování je vhodné si rozčlenit model na tři oblasti (viz Obr. 4 První fáze):

- **Black-box (Černá skříňka)** je část modelu, kde nejsou dostupné informace ohledně vnitřních mechanismů, výpočtů a procesů. Jedná se o plně uzavřený systém, kde jsou známy pouze vstupy a výstupy.
- **Grey-box (Šedá skříňka)** již zobrazuje část vnitřního kódu, mechanismu či procesu, ale není plně transparentní.
- **White-box (Bílá skříňka)** je část modelu, která je plně transparentní a je možné dohledat celý postup řešení krok po kroku.

Jako první krok při tvorbě modelu je důležité si vyčlenit jednotlivé komponenty, moduly či podsystémy, které jsou klíčové pro správnou funkcionalitu DD. Zbylé podsystémy, které nejsou zásadní, je dobré udržovat separátně a nezvyšovat tak výpočtovou náročnost. Jako další krok následuje definice úrovně modelování s ohledem na dostupná data pro jednotlivé podsystémy.



Ideální je mít co největší část podsystémů vedenou jako White-boxy. Jako poslední a výsledný krok je vytvoření předběžných modelů a jejich následné uspořádání do funkčního celku, který odráží dynamické vlastnosti fyzického protějšku [18].

### 2.2.2 VIRTUÁLNÍ SENSORY

Druhá fáze je zaměřena na výběr a tvorbu virtuálních senzorů neboli soft senzorů, jedná se o zkrácené slovné spojení software senzorů. Jedná se v podstatě o počítačově tvořené programy, které získávají data podobně jako klasické fyzické senzory, ale nejsou fyzicky spojeny s měřeným objektem. Jejich výhodou je možnost zpracovávat snadno měřitelné veličiny a pomocí strojového učení a matematických modelů je následně využít pro predikci obtížně měřitelných proměnných. Postup pro jejich tvorbu je shrnut do následujících tří kroků [18]:

- Stanovení virtuálních dat potřebných pro virtuální model, které budou využity pro následnou predikci obtížně měřitelných veličin. Při výběru je vhodné dbát ohled na celkový objem dat a náročnost jejich zpracování.
- Výběr vhodných virtuálních senzorů a přiřazení potřebných dat pro jejich funkci.
- Integrace virtuálních senzorů do systému DD. Zajištění datové toku potřebných informací z reálných senzorů a validace vypočtených veličin virtuálními senzory.

### 2.2.3 UPRAVENÍ PARAMETRŮ

V poslední fázi je hlavní cíl nastavení vzájemného propojení mezi digitálním dvojčetem a reálným protějškem pro pravidelnou synchronizaci dat (viz Obr. 4). Na základně dostupných prostředků, fyzických senzorů a ovládacích prvků jsou vybrány parametry, které je možné ladit. Následně je zapotřebí stanovit strukturu a váhu laděných parametrů podle vlivu na změnu funkčnosti a kvality chodu fyzického protějšku. Každý prvek musí mít stanovené intervaly ve kterých může ladění probíhat, aniž by byl systém vystaven riziku možného poškození. Velikost intervalů je flexibilní a ovlivňována ostatními laděnými i neměnnými parametry [18].

## 2.3 BATERIE A JEJICH MANAGEMENT

Jedná z nejvíce kritických částí elektrických vozidel je bateriový systém. Kapacita baterie je klíčovým parametrem pro stanovení dojezdu EV. Snahou většiny výrobců je maximalizovat dojezd vozidla. Nicméně navýšení kapacity baterie je většinou spojeno s nárůstem počtu bateriových článků. S tím je spojeno navýšení zástavbového prostoru potřebného pro umístění bateriového boxu, nárůst hmotnosti, navýšení jízdních odporů a dalších aspektů, které mohou negativně ovlivnit nejen dojezd EV [18].

Bateriový box (Battery pack) je složen z několika bateriových modulů, ve kterých jsou umístěny samotné bateriové články. Existuje několik typů bateriových článků z hlediska tvaru (cylindrické, prizmatické, ...) a použitých materiálů, nejčastěji lithium iontové. Na základě sériového či paralelního propojení článků a modulů je určena výsledná kapacita celého bateriového boxu a napětí. Počet bateriových článků se u EV pohybuje řádově od desítek až po tisíce. Kontrolní prvek pro baterii je Battery Management System (BMS), neboli Systém pro

řízení baterie. BMS integruje různorodé funkce, ovladače, senzory a vyhodnocovací systémy, které společně zajišťují spolehlivý a bezpečný provoz baterie s cílem maximalizace životnosti. Jednotlivé prvky jsou zobrazeny na Obr. 5.

BMS kontroluje a reguluje proudy a napětí v baterii jako celku, ale i pro jednotlivé bateriové články. Při nabíjení/vybíjení se musí články udržovat ve stanoveném intervalu napětí, aby nedošlo k jejich poškození. BMS umožňuje odpojení/zapojení jednotlivých článků, určuje počet zapojených baterií potřebných pro pohon vozidla a reguluje vyváženost článků při rekuperaci, respektive nabíjení. Důležité jsou také vstupní signály ze senzorů akceleračního a brzdového pedálu či startovacího systému [18]. Sukládáním a přenosem energie z bateriových článků do trakčního elektrického motoru je spojen i vznik tepla, které je nutné odvádět. BMS reguluje teplotu v chladicím okruhu, pro udržení optimální pracovní teploty, která se pro Li-ion bateriové články pohybuje v intervalu od 15 °C do 35 °C [19]. Důsledky provozu mimo dovolené teplotní intervaly mohou zahrnovat degradaci článků, snížení kapacity, životnosti a riziko poškození baterie.



Obr. 5 Schéma Battery management systému [18]

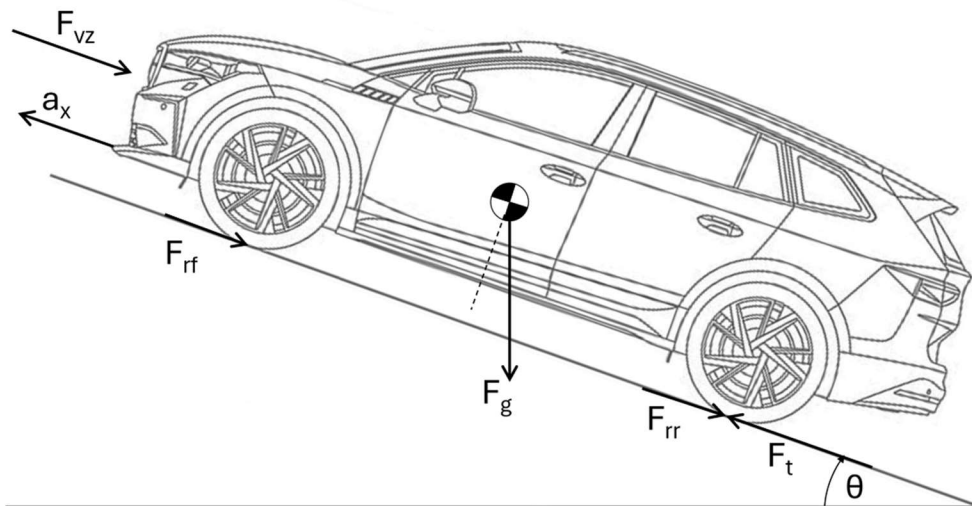
Je vhodné, aby uživatel elektrického vozidla měl dostupné informace v reálném čase ohledně veličin, které ovlivňují charakter jízdy či délku dojezdu. Mezi tyto informace se řadí stav nabití (SoC – State of Charge), dostupný výkon (SoP – State of available Power) nebo životnost (SoL – State of Life). Jedním z nejdůležitějších je stav nabití (SoC), který dává do poměru aktuálně dostupnou kapacitu s jmenovitou (celkovou) kapacitou baterie, a tedy procentuálně stanovuje množství energie dostupné pro pokračování v jízdě. Pro výpočet SoC jsou zapotřebí hodnoty celkového napětí baterie nebo proudu v obvodu, které

jsou doplněny o stav ujeté vzdálenosti ze sběrnice CAN. Stav nabití je ovlivňován nabíjecím a vybíjecím proudem, teplotou baterie a charakteru jízdy uživatele [18]. Jelikož na SoC závisí většina ostatních veličin, vysoká přesnost jeho odhadu je nezbytná. Pro odhad existuje několik různých výpočtových metod, které lze rozdělit do tří kategorií: elektrochemické, modelové a datově řízené metody. První metoda je založena na specifických metodách jako je například elektrochemická impedanční spektroskopie a vyžadují podrobnější informace ohledně fyzických vlastnostech bateriových článků a procesech přeměny energie. Základem modelové metody jsou vytvořené ekvivalentní modely baterií s výpočtovými algoritmy využívající například Kalmanův filter. Poslední datově řízené metody využívají například neuronové sítě či hluboké učení [20].

Pro zdokonalení odhadu stavu nabití baterie se vytvářejí různé typy digitálních dvojčat BMS. Jejich zapojením lze verifikovat a modifikovat nové metody pro určení SoC, jako je například algoritmus HIPF (H-infinity particle filter). Stále se navyšující nároky na počet bateriových článků klade vysoké požadavky na omezenou výpočetní kapacitu BMS. Tento nedostatek lze řešit využitím DT a přesunutím uložení dat a výpočtů na cloud [21].

### 3 PODÉLNÁ DYNAMIKA VOZIDLA

Řízení podélného pohybu modelu je jednou z hlavních částí pro vytvoření věrného virtuálního modelu vozidla. Podélná dynamika vozidla byla a je prověřována již po dlouhou dobu a vzniklo mnoho modelů, které dané téma popisují na odlišných úrovních. S vývojem technologií a výpočetních možností se stále zlepšuje úroveň a přesnost popisu jednotlivých veličin a charakteristik, které ovlivňují dynamické chování vozidla [22]. Při popisu podélného pohybu vozidla není nijak zvláště podstatný typ pohonné jednotky vozidla.



Obr. 6 Silové působení na zrychlující vozidlo po nakloněné vozovce

Základními veličinami, které ovlivňují dynamiku vozidla je hnací síla pohonné jednotky na kolech hnací nápravy, aerodynamický odpor vozidla, valivý odpor pneumatik, působení tíhových sil a odpor zrychlení vozidla [22]. Pro stanovení základní pohybové rovnice je uvažován dvourozměrný model vozu, který se pohybuje se zrychlením v přímém směru po nakloněné vozovce (viz. Obr. 6). Zjednodušený tvar rovnice je následovný[23]:

$$F_a = F_t - F_r - F_{vz} - F_g, \quad (3.1)$$

kde:

$F_a$	[N]	síla potřebná pro zrychlení vozidla,
$F_t$	[N]	celková hnací síla na kolech hnací nápravy,
$F_r$	[N]	síla valivého odporu kol,
$F_{vz}$	[N]	síla aerodynamického odporu vozidla,
$F_h$	[N]	odporová síla vlivem sklonu vozovky.

Rovnici (3.1) je možné dále upravit vyjádřením vlivu tíhové síly, síly potřebné pro zrychlení vozidla a rozdělení síly valivého odporu na jednotlivé nápravy, čímž získáme následující tvar [22][23]:

$$m \cdot a_x = F_t - F_{rf} - F_{rr} - F_{vz} - m \cdot g \cdot \sin(\theta), \quad (3.2)$$

kde:

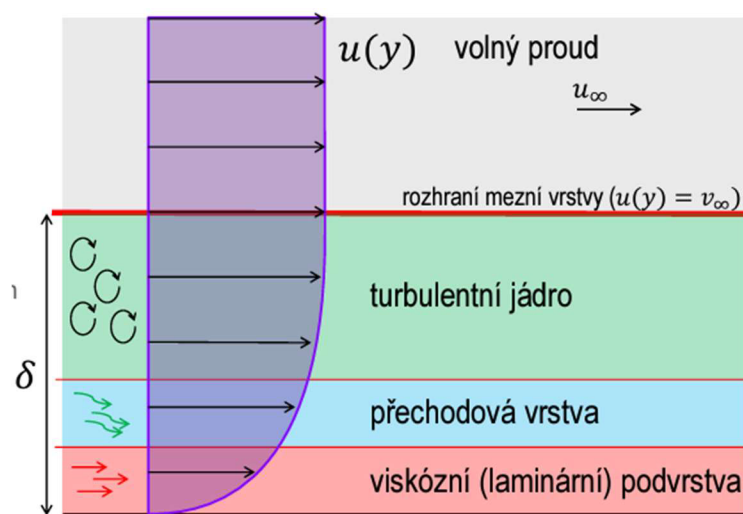
$m$	[kg]	provozní hmotnost vozidla,
$a_x$	[m·s <sup>-2</sup> ]	zrychlení vozidla v podélném směru,
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení,
$\theta$	[°]	úhel sklonu vozovky,
$F_{rf}$	[N]	síla valivého odporu kol na přední nápravě,
$F_{rr}$	[N]	síla valivého odporu kol na zadní nápravě.

### 3.1 AERODYNAMICKÝ ODPOR VOZIDLA

Při pohybu vozidla proudí vzduch podél karoserie vozu. Pro podélnou dynamiku je uvažováno, že proudící vzduch je usměřován tvarem karoserie do oblasti mezi vozovkou a spodní částí karoserie a podél horní části karoserie. Při proudění se mění rozložení tlaku v podélném směru a tlakový rozdíl v místech před a za vozidlem tvoří část aerodynamického odporu [22],[23]. Při obtékání těles je na povrchu vytvářena tenká laminární vrstva, která se dělí na tři části (Obr. 7):

- turbulentní vrstva (turbulentní jádro),
- přechodová vrstva a
- laminární podvrstva.

Mezní vrstva umožňuje rozvinutí proudění z nulové rychlosti na povrchu stěny k neovlivněnému proudění o rychlosti volného proudu v dostatečné vzdálenosti od stěny [24]. V laminární vrstvě je patrný projev smykového napětí a dochází zde ke ztrátám vlivem tření. Odpor třením je druhá část aerodynamického odporu [22],[23].



Obr. 7 Rozdělení mezní vrstvy při proudění podél stěny [24]

Pro stanovení výsledné odporové síly  $F_{vz}$  je použit následující vztah [22][23][25]:

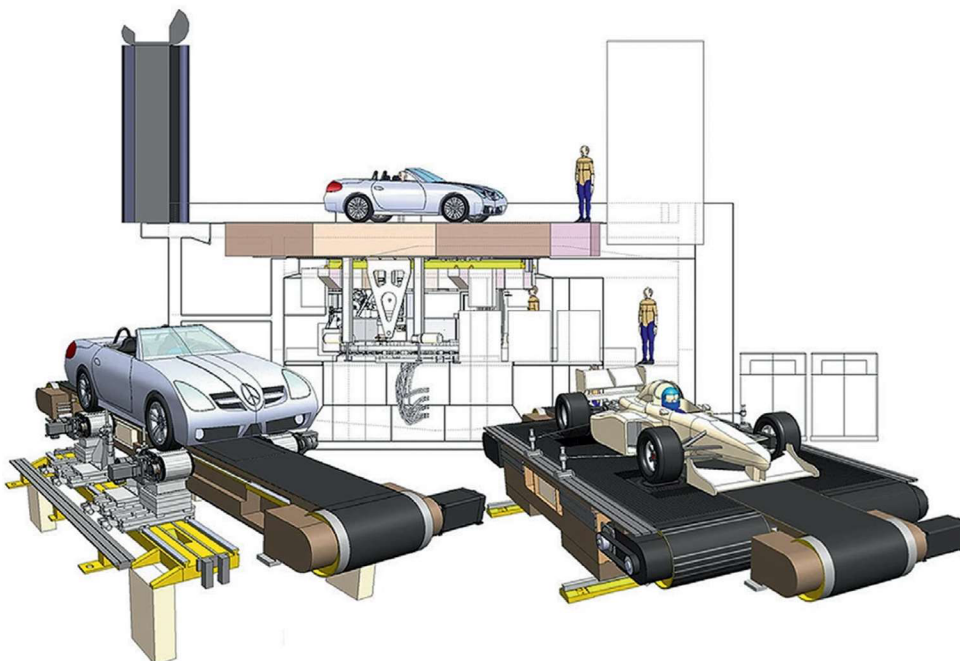
$$F_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot (v_x + v_w)^2 \quad (3.3)$$

kde:

$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu,
$C_d$	[-]	koeficient (součinitel) aerodynamického odporu,
$A_f$	[m <sup>2</sup> ]	obsah čelní plochy vozidla,
$v_x$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost vozidla vůči vozovce,
$v_w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost větru,
$v_x+v_w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	náporová rychlost.

Hustota vzduchu je proměnlivou veličinou a je závislá na teplotě a tlaku vzduchu. Jako standartní hodnota je zvolena hustota 1,225 kg·m<sup>-3</sup> při teplotě 15 °C a atmosférickém tlaku 101,32 kPa [22][25].











Z Rovnice (3.3) je patrné, že velikost aerodynamického odporu se mění s druhou mocninou náporové rychlosti. Při vyšších rychlostech se stává aerodynamický odpor dominantní složkou v rovnici 1. Pro přesný výpočet odporové síly je nutné dobře stanovit obsah čelní plochy vozidla a koeficient aerodynamického odporu [22][23]. Hodnota čelní plochy  $A_f$  se získává metodou projekce paralelního světla na čelní plochu vozidla a určení obsahu zastíněné plochy na stěně za vozidlem pomocí kamery s vysokým rozlišením [25]. Další možností je určit plochu z CAD dat.



Obr. 8 Ilustrované zobrazení simulace vozovky pomocí ubíhajícího pásu v aerodynamickém tunelu [26]



Určení koeficientu aerodynamického odporu je možné provést více metodami. Nejvěrohodnější je stanovení koeficientu experimentálně v aerodynamickém tunelu. Vozidlo, umístěné na tenzometrických vahách, je vystaveno proudícímu vzduchu o stanovené rychlosti. Výstupní veličinou měření je aerodynamická odporová síla. Koeficient aerodynamického odporu je dopočítáván nepřímo na základě získané síly, čelní plochy vozidla a dynamického tlaku [22]. Pro navýšení přesnosti je snaha o co nejpřesnější napodobení reálné jízdy vozidla, proto se vozidlo umisťuje na tenzometrické válce, aby bylo umožněno otáčení kol.

	Koeficient aerodynam. odporu $C_d$	Čelní plocha [m <sup>2</sup> ]	Aerodynamický odpor v [kW] pro různé rychlosti	
			40 km/h	120 km/h
 Malé vozy	0.29...0.37	2.05...2.20	0.5...0.7	13.2...18.1
 Kompaktní třída	0.22...0.32	2.18...2.28	0.4...0.6	10.7...16.2
 Kompaktní třída	0.23...0.35	2.20...2.38	0.4...0.7	11.3...18.5
 Combi	0.27...0.35	2.20...2.38	0.5...0.7	13.2...18.5
 Dodávka	0.25...0.35	2.40...3.20	0.5...0.9	13.4...24.9
 Kabriolet	0.28...0.38	1.94...2.20	0.4...0.7	12.1...18.6
 Terénní vozidlo	0.35...0.50	1.84...2.10	0.5...0.9	14.3...23.4
 Sportovní vozidlo	0.29...0.55	2.49...3.15	0.6...1.3	16.1...38.6
 Luxusní třída	0.27...0.40	1.65...2.20	0.4...0.7	10.0...19.6
 Luxusní třída	0.23...0.35	2.28...2.65	0.4...0.8	11.7...20.6

Obr. 9 Typické hodnoty koeficientu aerodynamického odporu, čelní plochy a celkového aerodynamického odporu pro vybrané typy osobních vozidel [27]

Dále se také simuluje vozovka pod vozidlem pomocí ubíhajícího pásu. Možné provedení je ilustrováno na Obr. 8 [26]. Druhou možností zjištění koeficientu je použití numerických výpočetních metod pro simulaci proudění okolo vozidla (CFD simulace). Další možností je určení aerodynamických vlastností z jízdních zkoušek jako je například dojezdová zkouška či zkouška za konstantní rychlosti. Cílem zkoušek je stanovení celkového jízdního odporu působící na vozidlo [22]. Na Obr. 9 jsou prezentovány přibližné hodnoty koeficientu aerodynamického odporu, obsahu čelní plochy a celkového aerodynamického odporu vyjádřeného v kW. Při vývoji plně elektrických vozidel hraje návrh tvaru karoserie poměrně důležitou roli, protože i nepatrné snížení hodnoty koeficientu aerodynamického odporu pozitivně ovlivňuje dojezd vozidla. Pro vozidla malých rozměrů, které jsou provozovány převážně v městském provozu a po většinu jízdy nepřesahují rychlost 90 km·h<sup>-1</sup>, se ztráty

pohybují v rámci desetin až jednotek kW. Elektrická vozidla jsou však často koncipována jako rozměrnější vozidla, například jako SUV (Sport utility vehicle), které jsou provozovány jak při nízkých rychlostech v městském provozu, tak i při vysokých rychlostech mimo města a na dálnicích. Koeficient  $C_d$  pro tyto vozidla se pohybuje okolo hodnoty 0,3. Při rychlostech nad  $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  dosahuje ztrátový výkon hodnot v desítkách kW, a při jízdě na dlouhé vzdálenosti způsobuje snížení celkového dojezdu v jednotkách až desítkách procent [27].

### 3.2 VALIVÝ ODPOR

Valivý odpor vzniká z důvodu deformace pneumatiky a vozovky při vzájemném kontaktu. Pro nehybné vozidlo je tíhové zatížení vozidla vyvažováno normálovou silou, která směřuje do středu pneumatik. Kontaktní plocha (stopa) je symetrická. Při odvalování pneumatiky dochází ke změně tvaru a velikosti kontaktní plochy a tlakové rozložení po stopě není symetrické. V přední části stopy je tlak vyšší oproti zadní části a silové působení normálové síly je předsunuto do přední části mimo střed pneumatiky [22]. Vychýlení má za následek vytvoření momentu, který brzdí kolo. Vlivem hystereze vznikají ztráty ve formě tepla při opětovném stlačování a navrácení do původní polohy. Rovnice pro stanovení velikosti síly valivého odporu je následující [23][25]:

$$F_{rf} + F_{rr} = F_z \cdot f_r \cdot \cos \theta = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \theta, \quad (3.4)$$

kde:

$F_z$	[N]	normálová síla zatížení,
$f_r$	[-]	součinitel valivého odporu.

Součinitel valivého odporu je ovlivňován více faktory. Mezi ty hlavní lze zařadit povrchu vozovky, konstrukce a materiál pneumatiky, které určují způsob deformace pneumatiky. Deformaci pneumatiky také ovlivňuje rychlost vozidla, tlak vzduchu v pneumatice (huštění) a teplota pneumatiky, která ovlivňuje vlastnosti pneumatiky. Při vysokých rychlostech se pneumatika nestihne vrátit do původního tvaru a vstupuje do stopy již s částečnou deformací, tím dochází k navýšení vyosení normálové síly  $F_z$  a nárůstu součinitele valivého odporu  $f_r$  [25]. Typické hodnoty součinitele valivého odporu pro pneumatiky vybraných typů vozidel na různých površích jsou na Tab. 1.

Tab. 1 Typické hodnoty součinitele valivého odporu pro pneumatiky vybraných typů vozidel na různých površích [27]

Pneumatiky osobního automobilu na povrchu vozovky	Součinitel valivého odporu $f_r$
velké dlažbě	0,011
malé dlažbě	0,011
betonu, asfaltu	0,008
válcovaném šterku	0,02
nezpevněné cestě	0,05
poli	0,1 – 0,35



### 3.3 ODPOR STOUPÁNÍ

Vozidlo je vystaveno tíhovému působení Země a při jízdě po skloněné vozovce zpomaluje, respektive urychluje vozidlo v závislosti na směru sklonu. Při stoupání vozidla je také ovlivněno rozložení zatěžovacích sil na přední a zadní nápravě. Změna síly ovlivňuje hodnotu hnací síly, které kola jednotlivých náprav přenesou. Síla odporu stoupání je dána vztahem:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (3.5)$$

### 3.4 CELKOVÁ HNACÍ SÍLA A ZTRÁTY V HNACÍM ÚSTROJÍ

Pro pohyb vozidla a jeho dynamické vlastnosti je určující velikost hnací síly, která je přenášena na hnací kola. Pro stanovení hnací síly na jednotlivých nápravách je nejprve nutné si vyjádřit zatížení přední a zadní nápravy, respektive velikost normálových sil na kola náprav. Výchozími body pro sepsání rovnic momentové rovnováhy jsou kontaktní body pneumatik přední a zadní nápravy s vozovkou. Body F, R a další silové a rozměrové veličiny jsou zobrazeny na Obr. 10. Předpokládá se, že působí síla aerodynamického odporu je v těžišti vozidla. Z rovnic momentové rovnováhy jsou vyjádřeny normálové síly jednotlivých náprav a vztahy jsou následující [23]:

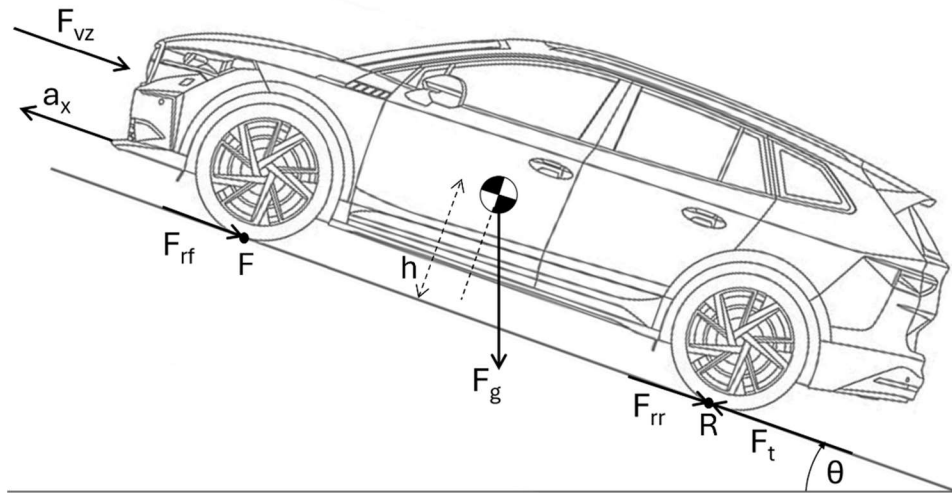
$$\sum M_F = 0, \quad \sum M_R = 0, \quad (3.6)$$

$$F_{zf} = \frac{-F_{vz} \cdot h - m \cdot g \cdot h \cdot \sin(\theta) - m \cdot a_x \cdot h + m \cdot g \cdot l_f \cdot \cos(\theta)}{l_f + l_r}, \quad (3.7)$$

$$F_{zr} = \frac{F_{vz} \cdot h + m \cdot g \cdot h \cdot \sin(\theta) + m \cdot a_x \cdot h + m \cdot g \cdot l_f \cdot \cos(\theta)}{l_f + l_r}, \quad (3.8)$$

kde:

$M_F$	[N·m]	výsledný moment v bodě F,
$M_R$	[N·m]	výsledný moment v bodě R,
$F_{zf}$	[N]	normálová síla (dynamické zatížení) přední nápravy,
$h$	[m]	výška těžiště vozidla,
$l_f$	[m]	vzdálenost přední nápravy (bodu F) od těžiště vozidla,
$l_r$	[m]	vzdálenost zadní nápravy (bodu R) od těžiště vozidla,
$F_{zr}$	[]	normálová síla (dynamické zatížení) zadní nápravy.



Obr. 10 Silové zatížení vozidla - podle [23]

Celková hnací síla je dána součtem jednotlivých hnacích sil na přední a zadní nápravě, které se dají vyjádřit také jako součin příslušné normálové síly a koeficientu tření:

$$F_t = F_{xf} + F_{xr}, \quad (3.9)$$

$$F_{xf} = F_{zf} \cdot \mu_f, \quad F_{xr} = F_{zr} \cdot \mu_r, \quad (3.10)$$

kde:

$F_{xf}$	[N]	hnací síla přední nápravy,
$F_{xr}$	[N]	hnací síla zadní nápravy,
$\mu_f$	[-]	koeficient tření přední nápravy,
$\mu_r$	[-]	koeficient tření zadní nápravy.

Krouticí moment, který generuje motor pohonné jednotky, je přenášen hnací kola s určitými ztrátami. Lze sem zařadit ztráty způsobené vlivem tření a setrvačností rotačních hmot motoru a hnacího ústrojí. Konstrukce hnacího ústrojí není jednotná pro vozidla se spalovacím motorem, hybridním či čistě elektrickým pohonem a v určitých koncepcích je možné určité ztráty eliminovat. Například pro koncepcie EV s umístěnými elektrickými motory v blízkosti hnacích kol, případně přímo v nich, jsou redukovány ztráty způsobené setrvačnou rychlostí ozubených kol převodovky a hnacích hřídelí. Nicméně obecný vztah pro provázanost mezi celkovou hnací silou na kolech a krouticím momentem motoru je následovný [23][27]:

$$F_t = \frac{T_e \cdot N_{tf} \cdot \eta_{tf}}{r} - [(I_e + I_t) \cdot N_{tf}^2 + I_d \cdot N_f^2 + I_w] \cdot \frac{a_x}{r^2}, \quad (3.11)$$

kde:

$T_e$	[N·m]	krouticí moment motoru (měřený na dynamometru),
$N_{tf}$	[-]	celkový převodový poměr převodovky a stálého převodu,
$\eta_{tf}$	[-]	společná účinnost převodovky a rozvodového ústrojí,
$r$	[m]	poloměr kola hnací nápravy,

---

$I_e$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	moment setrvačnosti motoru,
$I_t$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	moment setrvačnosti převodovky,
$I_d$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	moment setrvačnosti spojovacích hřídelí,
$N_f$	$[-]$	převodový poměr stálého převodu,
$I_w$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	moment setrvačnosti hnacího kola.

## 4 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Tato kapitola je zaměřena na přehled vybraných odborných článků zabývajících se modelováním hnacího ústrojí převážně elektrických vozidel. K vytváření modelů se v dnešní době uplatňují různé přístupy. Každá z těchto metod má své specifické výhody i nevýhody. Struktura, komplexnost a různorodost je dána zadanými požadavky na přesnost výsledků, kvantitou i kvalitou vstupních dat, dostupnými finanční prostředky či časovým rámcem projektu. Přístupy lze rozřadit do dvou kategorií [28]:

- fyzikálně založené modelování (anglicky Model-driven modelling nebo také Physics based modelling), zkratka MDM,
- datově řízené modelování (anglicky Data-driven modelling), zkratka DDM.

Fyzikálně založené modelování (MDM) je založeno na matematickém popisu daného systému a dílčích částí. Předpokladem pro funkčnost modelu je detailní znalost principu fungování systému a schopnost jeho popisu na požadované úrovni. Tento způsob nevyžaduje velké množství vstupních dat [28]. Je vhodný pro návrh a optimalizaci parametrů hnacího ústrojí. Přesnost výsledků je ovlivněna počtem parametrů, které zasahují do chování systému, ale jsou při modelování zanedbány.

Datově řízené modelování (DDM) je naopak využíváno v situacích, kdy se jedná o komplexní problematiku, u níž je obtížné vytvořit přesný matematický popis. Model je vytvářen na základě velkého množství vstupních dat a není vyžadována hlubší znalost vzájemně ovlivňujících se parametrů. Mezi výhody lze zařadit, že do modelu je možné zahrnout velké množství parametrů a okolních aspektů. DDM umožňuje s dostatečným rozsahem poskytnutých dat popis systému i za specifických provozních podmínek. Nevýhodou této metody je potřeba velkého množství naměřených dat, které jsou použity nejen pro trénování (tvorbu) modelu, ale i pro predikci výsledků [28]. Tyto modely dosahují většinou přesnějších výsledků, nicméně při práci s daty z okrajových oblastí, které se velmi odlišují od trénovacích dat, je relevantnost výsledků snížena. Používají se zde stavově-prostorové modely (anglicky state-space models), někdy označovány jako dynamické lineární modely, dále regresní nelineární modely, umělé neuronové sítě a další.

Oba typy modelování mají své přednosti a výběr přístupu se odvíjí od požadavků uživatele. Pro dosažení optimálních výsledků je možné oba přístupy vzájemně kombinovat.

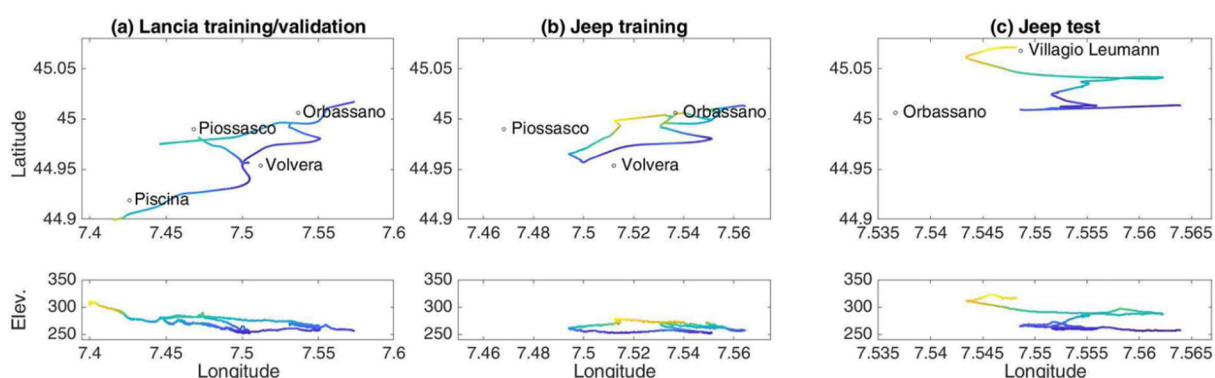
### 4.1 POROVNÁNÍ FYZIKÁLNĚ ZALOŽENÝCH A DATOVĚ ŘÍZENÝCH MODELŮ V REÁLNÝCH JÍZDNÍCH PODMÍNKÁCH

Na základě práce s názvem *Londgitudinal Vehicle Dynamics: Comparison of Physical and Data-Driven Models Under Large-Scale Real-World Driving Conditions* [29] od pana Sebastiana S. Jamese a jeho kolegů je zde představeno porovnání mezi třemi odlišnými způsoby tvorby modelu podélné dynamiky vozidla. Modely jsou vytvořeny na základě naměřených dat z běžného provozu a měření proběhlo na dvou vozidlech – Lancia Delta a Jeep Renegade. Měření proběhlo na veřejných komunikacích v Itálii v okolí města Turín.

V jednotlivých kapitolách jsou představeny podrobněji jednotlivé typy modelů podélné dynamiky vozidla. Jako první je uvedena konvenční metoda založena na matematickém popisu

a vychází z pohybové rovnice uvedené v kapitole 3. Další dvě metody spadají do kategorie DDM a jedná se dynamický lineární model, někdy nazývaný také jako stavově-prostorový (State-space model), a model využívající umělou neuronovou síť.

Měřený okruh pro vozidlo Lancia Delta měřil 53 km a jízda trvala zhruba 2500 s. Druhé vozidlo, Jeep Renegade, absolvovalo dva okruhy, kdy první měřil necelých 25 km a trval 1600 s a druhý okruh 15 km a 800 s. Obě vozidla zajela své okruhy dvakrát, aby bylo zajištěno dostatečné množství dat pro vytvoření, respektive trénování, modelů a jejich následnou validaci. Jednotlivé trasy i s odpovídající nadmořskou výškou jsou zobrazeny na Obr. 11. Obě vozidla zaznamenávala rychlost vozidla v podélném směru, pozici plynového (akceleračního) pedálu, pozici brzdového pedálu, zařazený rychlostní stupeň, točivý moment motoru a souřadnice z GPS se vzorkovací frekvencí 20 Hz.



Obr. 11 Měřené okruhy na veřejných komunikacích s barevnou škálou reflektující nadmořskou výšku pro a) Lancia Delta b) c) Jeep Renegade – převzato z [29]

#### 4.1.1 FYZIKÁLNÍ MODEL

Jak již bylo zmíněno, základem pro popis modelu je pohybová rovnice, kdy oproti rovnici (3.1) vyčlenili autoři samostatně i brzdou sílu a rovnice je zapsána v následujícím tvaru[28]:

$$m \cdot a_x = F_t - F_b - k_D \cdot v_x^2 - m \cdot g \cdot \sin(\theta) - m \cdot g \cdot f_r, \quad (4.1)$$

kde:

$F_b$	[N]	brzdou síla,
$k_D$	[kg·m <sup>-1</sup> ]	koeficient odporu.

Jelikož během záznamu nedošlo ke zpětnému pohybu vozidla (pouze kladná rychlost), autoři upravili datové záznamy za účelem eliminování přechodu mezi dynamickými a statickými podmínkami. Při rychlostech nižších než 0,5 m·s<sup>-1</sup> je automaticky nastavena nulová hodnota brzdou síly  $F_b$  a úhlu stoupání  $\theta$  a během simulace není možné dosáhnout záporné rychlosti.

Při stanovení velikosti hnací síly autoři zanedbali ztráty způsobené setrvačností rotačních hmot hnacího ústrojí a sílu  $F_t$  určili následovně:

$$F_t = \frac{T_e \cdot N_t \cdot N_f \cdot \eta_t \cdot \eta_f}{r}, \quad (4.2)$$

kde:

$N_t$	[-]	převodový poměr převodovky,
$N_f$	[-]	převodový poměr stálého převodu,
$\eta_t$	[-]	účinnost převodovky,
$\eta_f$	[-]	účinnost převodového ústrojí,

Hodnoty pro točivý moment motoru je získáván z řídicí jednotky motoru, poloměr hnacího kola i převodové poměry rychlostních stupňů jsou známy pro obě vozidla, zařazený rychlostní stupeň je monitorován a zbylé veličiny jsou neznámé. Proto je rovnice (4.2) zjednodušena a neznámé parametry jsou nahrazeny pomocí jednoho koeficientu:

$$F_t = T_e \cdot N_t \cdot k_\tau, \quad (4.3)$$

kde:

$k_\tau$	[m <sup>-1</sup> ]	koeficient hnací síly.
----------	--------------------	------------------------

Pro nalezení hodnot neznámých koeficientů  $k_\tau$ ,  $k_D$  a  $f_r$  použili autoři testovací data. S využitím funkce „fmincon“ v softwaru Matlab, která slouží k nalezení minima nelineární funkce s více proměnnými s předem zadanými omezeními. Pro jednotlivé neznámé byly nastaveny intervaly, se kterými může daný algoritmus pracovat. Pro odhad počátečních parametrů byl využit řešič diferenciálních rovnic pro tuhé systémy ode23s, který zvládá odhad parametrů i v krajních oblastech, kde jsou vysoké odchylky vůči trénovacím datům. Následně byl využit řešič ode23 a po několika iteracích se podařilo zpřesnit intervaly jednotlivých koeficientů.

#### 4.1.2 DYNAMICKÝ LINEÁRNÍ MODEL

Dynamický lineární model popisuje, jak se dynamické parametry mění v průběhu času. Model je popsán pomocí soustavy dvou stavových rovnic [28]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (4.4)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (4.5)$$

kde:

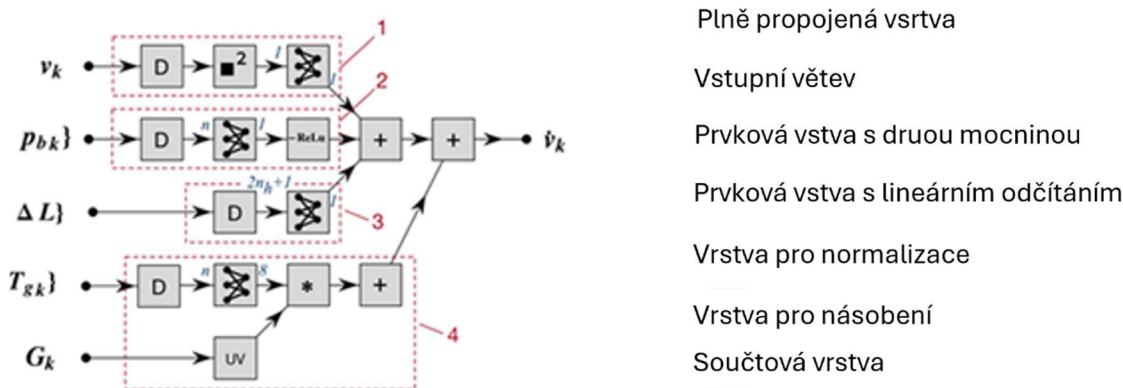
$x(t)$	[-]	stavový vektor tvořený stavovými proměnnými,
$u(t)$	[-]	vstupní vektor,
$y(t)$	[-]	výstupní vektor,
$A, B$	[-]	parametrizované matice první stavové rovnice,
$C, D$	[-]	parametrizované matice druhé stavové rovnice.

Vstupní vektor  $u(t)$  je tvořen z točivého momentu na výstupu převodovky, hodnoty tlaku v brzděm okruhu vozidla a v některých případech také z úhlu stoupání vozovky. Výstupem  $y(t)$  je rychlost vozidla v čase. Matice  $A$  až  $D$  obsahují jednotlivé neznámé parametry a jejich závislosti. Pro stanovení těchto parametrů jsou všechny spojeny do jednoho vektoru a určeny pomocí metody odhadu predikční chyby (anglicky prediction error method). Princip spočívá v minimalizaci velikosti rozdílu mezi rychlostí vozidla z testovacích dat a výstupní rychlostí určené pomocí soustavy rovnic.

### 4.1.3 MODEL UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ

Na základě inspirace fyzikálním modelem je neuronová síť tvořena čtyřmi podsítěmi (větvemi), které reprezentují vliv hnací síly, brzdné síly, odporu stoupání vozovky a společného vlivu aerodynamického a valivého odporu. Struktura sítě je zobrazena na Obr. 12. Výstupem neuronové sítě je predikce rychlosti vozidla pomocí dopředné diference. Tréninková data pro neuronovou síť jsou stejná jako pro oba předchozí modely. Každá větev má určitý počet trénovatelných parametrů a příslušných váh, celkový počet je 248 trénovatelných parametrů. Učení vždy probíhá v plně propojených vrstvách. Každá větev má vstupní vrstvu označenou písmenem D a po jednotlivých operacích jsou výstupy slučovány ve vrstvách označených symbolem plus „+“.

První větev učí model vliv aerodynamického a valivého odporu. Rovnice pro učení je ve tvaru  $v^2 + b_1$ , kde druhá mocnina indikuje spojitost s aerodynamickým odporem a konstantní člen  $b_1$  je určený pro valivý odpor. Druhá větev je zaměřena na brzdnu sílu. Model zpracovává hodnoty tlaku v brzdém okruhu a vytváří propojenost mezi tlakem a výsledným zrychlením vozidla. Pro zlepšení konvergence je přidána ReLu (anglicky rectified linear unit) vrstva, která propouští pouze záporné hodnoty.



Obr. 12 Struktura modelu neuronové sítě - převzato z [29]

Ve třetí větvi je určován sklon vozovky. Na rozdíl od předešlých modelů je sklon vozovky odhadován přímo z naměřených dat z GPS. Vstupem je nadmořská výška, ze které je sklon určován. Odhad je stanoven z 21 výškových bodů ze záznamu z 10 m před a za vozidlem. Poslední větev je zaměřena na hnací sílu a točivý moment motoru. Do této vrstvy jsou vkládány dvě vstupní informace. První je hodnota točivého momentu motoru a druhá je informace ohledně zařazeného rychlostního stupně. Z plně propojené vrstvy je vyveden počet výstupů rovný počtu převodových stupňů dané převodovky včetně neutrálu. V této vrstvě se snaží model najít vzájemnou vazbu mezi točivým momentem a výsledným zrychlením vozidla pro každý převodový stupeň. V následující vrstvě je ze všech výstupů aktivní pouze ten, který odpovídá aktuálně zařazenému rychlostnímu stupni. Posledním krokem je následné sloučení jednotlivých výstupů ze všech čtyř větví.

### 4.1.4 VÝSLEDKY A POROVNÁNÍ MODELŮ

Jako hlavní kritéria pro vzájemné porovnání výsledků jednotlivých modelů vybrali autoři podíl vysvětlené variance závislé proměnné (anglicky variance accounted for – VAF) a střední

kvadratickou odchylkou (anglicky root mean square error – RMSE). VAF vyhodnocuje podíl rozptylu rozdílu mezi skutečnými naměřenými hodnotami a hodnotami ze simulace vůči celkovému rozptylu naměřených hodnot, respektive vykazuje, kolik procent variability je zachyceno výsledky modelu. Určuje se v procentech a při hodnotách nad 80 % lze modely považovat za poměrně přesné. Vzorec pro metriku VAF je následující:

$$VAF = 100 \cdot \left(1 - \frac{\text{var}(y-\hat{y})}{\text{var}(y)}\right), \quad (4.6)$$

kde:

VAF	[%]	vysvětlená variance závislé proměnné,
$\hat{y}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost vozidla z modelu,
var(y)	[-]	rozptyl naměřených hodnot rychlostí vozidla.

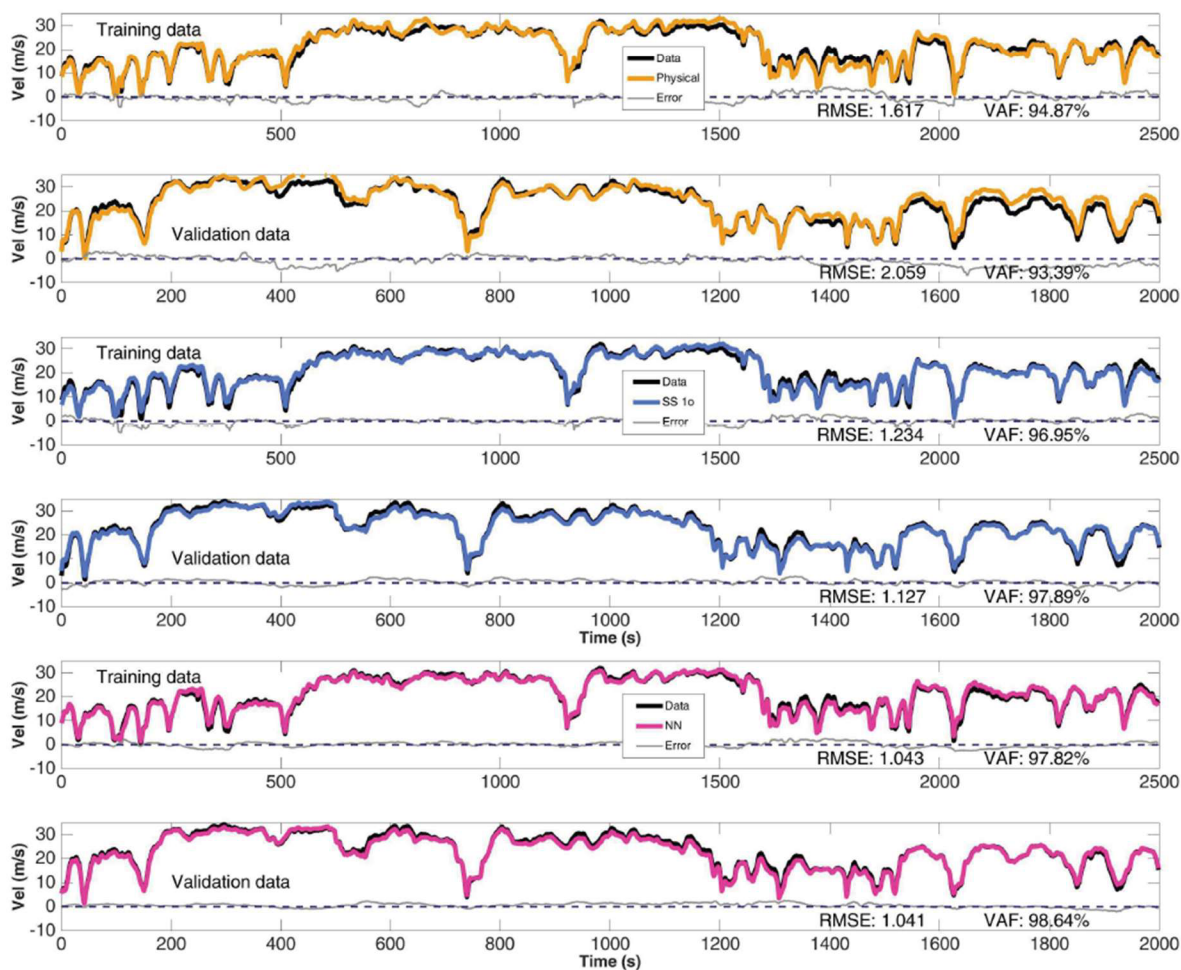
Na Obr. 13 jsou zobrazeny naměřené a odhadnuté průběhy rychlosti vozidla pomocí jednotlivých modelů pro vůz Lancia Delta. Výsledky ukazují porovnání obou rychlostí jak pro trénovací data, tak i pro data validační. Hodnoty porovnávacích kritérií jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2 Výsledné hodnoty pro metriku VAF a RMSE pro všechny modely a vozidla – převzato z [29]

	<i>Lancia Delta</i>				<i>Jeep Renegade</i>			
	<i>Trénovací data</i>		<i>Validační data</i>		<i>Trénovací data</i>		<i>Validační data</i>	
	RMSE [m·s <sup>-1</sup> ]	VAF [%]	RMSE [m·s <sup>-1</sup> ]	VAF [%]	RMSE [m·s <sup>-1</sup> ]	VAF [%]	RMSE [m·s <sup>-1</sup> ]	VAF [%]
<b><i>Fyzikální model</i></b>	1,647	94,87	2,059	93,39	3,394	86,47	4,011	80,14
<b><i>Dynamický lineární model</i></b>	1,234	96,95	1,127	97,89	2,767	89,19	2,759	90,26
<b><i>Model umělé neuronové sítě</i></b>	1,043	97,82	1,041	98,64	1,690	96,90	1,463	97,30

Z jednotlivých průběhů rychlostí, tak i z výsledných hodnot je patrné, že všechny tři metody dosáhly poměrně přesných výsledků. Hodnoty VAF neklesly ani v jednom případě pod hodnotu 80 % a ve většině případů se pohybovaly okolo 95 %. Z výsledků je patrné, že metody spadající pod datově řízené modelování, tedy dynamický lineární model a model umělé neuronové sítě, dosahovaly přesnějších výsledků než fyzikální model. Nejpřesnější predikce rychlosti vozidla bylo dosaženo při použití modelu umělé neuronové sítě s konečnou hodnotou VAF 98,64 % a to pro vůz Lancia s validační sadou dat. Navzdory předpokladu, že při provádění predikce rychlosti na trénovacích datech by měly modely dosahovat vyšší přesnosti než na datech validačních, se u dynamického lineárního modelu i modelu umělé neuronové sítě podařilo predikovat výsledky přesněji pro validační data. To je pravděpodobně způsobeno nižším výskytem velkých gradientů akcelerace a decelerace vozidla u validačních sad dat. Detailnější popis jednotlivých modelů, přesný postup pro jejich modelování a další dosažené výsledky jsou uvedeny v [29].





Obr. 13 Výsledné průběhy naměřených a predikovaných rychlostí pro jednotlivé metody pro vůz Lancia Delta – převzato z [29]

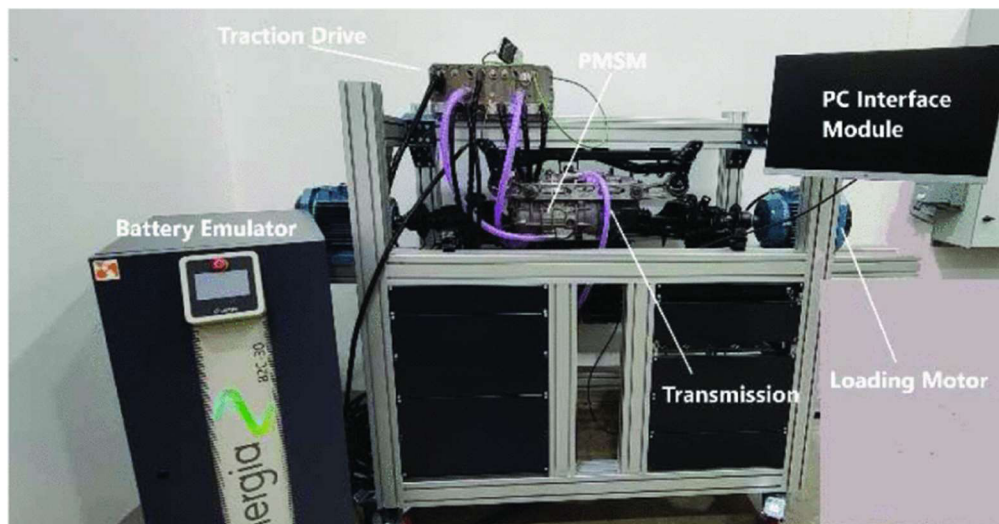
## 4.2 MODELOVÁNÍ DIGITÁLNÍHO DVOJČETE ELEKTRICKÉHO MĚNIČE

Tato kapitola odkazuje na práci Mahmouda Ibrahima a jeho kolegů [30], kteří se zabývají tvorbou digitálního dvojčete měniče v elektrickém pohonném systému na základě naměřených jízdních dat. Měnič je součástí elektrického pohonného systému a umožňuje řízení elektrického motoru. Transformuje stejnosměrný elektrický proud přiváděný z baterie vozu na střídavý proud dodávaný do elektromotoru. Pomocí změny frekvence střídavého proudu je umožněno řízení rychlosti otáčení a točivého momentu elektromotoru. Měnič zajišťuje i zpětný tok a transformaci elektrické energie, získané při rekuperaci, a její uložení zpět do baterie vozidla [30].

### 4.2.1 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Fyzický testovací stav je sestaven z měniče z autonomního vozidla Iseauto od společnosti Auve Tech s řízením motoru orientovaného podle magnetického pole (Field-Oriented Control – FOC). Měnič ovládá synchronní motor s permanentními magnety (Interior permanent magnet

synchronous motor – IPMSM) s označením Y4F1. Jako zdroj elektrické energie je využit bateriový simulátor (emulátor) B2C 30 od společnosti Cinergia, který nahrazuje bateriové články reálného elektrického vozu. Na výstupní hřídeli z elektromotoru je nainstalována čtyřstupňová převodovka F1E1A a diferenciál. Pro simulaci pohybu kol jsou na výstupních poloosách diferenciálu umístěny asynchronní (indukční) elektromotory[30]. Celý systém doplněný o PC jednotku s vizuálním rozhraním pro ovládání měniče je zobrazen na Obr. 14.



Obr. 14 Testovací stav elektrického pohonného systému [30]

#### 4.2.2 TVORBA MODELU MĚNIČE

Pro modelování digitálního dvojčete lze přistupovat dvěma způsoby. První je tvorba modelu založená na měřených datech (Data-driven modeling - DDM), které slouží k popisu chování daného systému. Tato metoda je vhodná pro systémy, které je obtížné popsat pomocí rovnic. DDM využívá regresivní analýzu, neuronové sítě a strojovém učení. Oproti tomu je druhý způsob, který vychází z matematického popisu modelu (Model-driven modeling – MDM)[30]. Chování systému je ovlivněno přesností definice a popisu vytvořeného modelu. MDM slouží k popisu jednodušších systémů, vyžaduje nižší časové i výpočtové nároky oproti DDM, ale často vykazuje nižší přesnost výsledků. Pro tvorbu modelu elektrického měniče se autoři rozhodli zvolit metodu DDM.

Model měniče je tvořen v prostředí MATLAB a využívá umělé neuronové sítě (Artificial neural network - ANN) s nelineární regresí. ANN je tvořena ze vzájemně propojených umělých neuronů, které přijímají vstupní data, zpracovávají je a výstupní data jsou zaslána mezi další neurony. Neuronová síť se dělí na tři vrstvy[30]:

- vstupní vrstva obsahuje neurony, do kterých jsou vkládány vstupní data a referenční hodnoty,
- skrytá vrstva obsahuje řádově větší počet neuronů než vstupní a přejímá data ze vstupní vrstvy a extrahuje informace,
- výstupní vrstva generuje požadované výstupní veličiny.

V případě modelu měniče jsou pro neurony ve vstupní vrstvě zadány hodnoty stejnosměrného proudu a napětí z pomyslné baterie vozidla. Dále vstupní vrstva obsahuje hodnoty ze zpětné vazby elektromotoru jako je rychlost otáčení a požadovaný krouticí moment. Výstupem jsou

hodnoty napětí a proudu střídavého proudu, který generuje otáčivé magnetické pole na statoru elektromotoru.

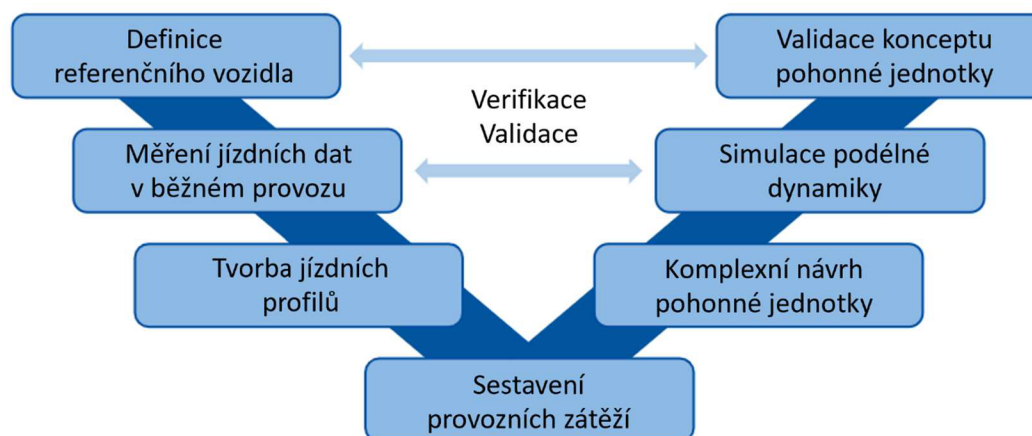
Aby ANN fungovala správně, je nutné ji poskytnout tréninková data, které umožní síti rozpoznávat vzorce a vztahy v datech a generovat odpovídající výstupy. Pro trénink ANN jsou použity čtyři sady naměřených dat z testovacího zařízení při různých zátěžích (od 5 % až po 80 %) a otáčkách motoru, které obsahovaly vstupní i výstupní veličiny. Pro navýšení přesnosti modelu byly použity tři typy umělé neuronové sítě, které zpracovávají různý počet parametrů a množství dat.

#### 4.2.3 VERIFIKACE MODELU

Autoři zvolili verifikaci na dvou úrovních. Jako první vložili do vytvořeného modelu elektrického měniče stejná data, která byla použita pro trénink modelu. Tímto je otestována funkčnost modelu vůči známým výsledkům z měření. Předpověď průběh výstupních hodnot napětí a proudu se poměrně shodoval se skutečnými hodnotami, nicméně zde docházelo v určitých bodech k nezanedbatelným výchyilkám. V druhém kroku pracoval model s již neznámými daty a měl prokázat schopnost modelu predikovat výsledky s dostatečnou přesností. Pro ověření přesnosti museli být data s novými vstupními parametry dodatečně doměřena. Výsledné průběhy opět vykazovaly výchyilky, nicméně prokázali, že model je schopný identifikovat vzory v neznámých datech a dodržovat vztahy mezi proměnnými. Výsledná přesnost odhadu se pohybovala okolo 85,5 %.

### 4.3 POSTUP NÁVRHU ELEKTRICKÉHO POHONNÉHO SYSTÉMU NA ZÁKLADĚ NAMĚŘENÝCH DAT

S využitím článku *Integration of Real Driving Data into the Electric Powertrain Design Process for Heavy-duty Trucks* [28] je tato kapitola zaměřena na popis konceptu návrhu elektrického pohonu pro nákladní automobily. Cílem návrhu je přispět k rozšíření elektrifikace v oblasti nákladních vozidel. Provázanost dat z reálných jízd s vývojem elektrického pohonu umožňuje přesnější formulaci specifických požadavků pro dané vozidlo.



Obr. 15 V-diagram rozšířené metodologie návrhu pohonného ústrojí [28]

#### 4.3.1 POSTUP NÁVRHU HNACÍHO ÚSTROJÍ

Vývoj je zaštiťován Porýnsko-Vestfálskou technickou Univerzitou v Cáchách v Německu, konkrétně Institutem Automobilového inženýrství, kde právě za účelem podpory elektrifikace pohonných systémů pro těžká nákladní vozidla byla vyvinuta metodologie holistického návrhu konceptu pohonných ústrojí. Pro větší komplexnost návrhu jsou do procesu integrována data reálných jízdních profilů. Jednotlivé kroky této metody jsou zobrazeny pomocí V diagramu na Obr. 15.

Výchozím krokem je vybrání vhodného referenčního vozidla se spalovacím motorem, které má být elektrifikováno, případně nahrazeno plně elektrickým vozidlem. Z referenčního vozidla jsou vybrány výchozí parametry pro tvorbu nového pohonu. Mezi základní veličiny patří maximální rychlost vozidla, provozní hmotnost a požadovaná nosnost. Dále sem patří i požadavky z hlediska vnitřní výbavy vozidla, výrobních nákladů a specifických parametrů, které vychází z norem pro daný segment vozidla. Jako druhý bod je získání dat z reálných jízd při běžném provozu referenčního vozidla [28]. Data obsahují informace o vozidle, trase a o okolních podmínkách jako teplota, tlak, rychlost okolního vzduchu a další. Následuje krok, kdy jsou vytvářeny odpovídající jízdní profily. Jízdní profil obsahuje informace převážně ohledně podélné dynamiky vozidla. Dále jsou zde zahrnuty doplňující data, například nakládání a vykládání nákladu, která ovlivňují chování vozidla.

Na základě jízdních profilů jsou vytvářeny jednotlivé komponenty pohonného ústrojí. Mezi tyto komponenty patří elektrický motor, baterie, elektrický měnič, převodovka a rozvodové ústrojí včetně stálého převodu. Komponenty jsou upravovány, aby vyhovovaly i základním parametrům referenčního vozidla z prvního kroku. Pro jednotlivé části je možné sestavit více variant. V následujícím kroku je vytvářen komplexní návrh, kde je z jednotlivých variant sestavován funkční celek. Mezi poslední kroky patří tvorba simulací podélné dynamiky vozidla pro ověření splnění požadavků plynoucích z naměřených jízdních dat. Postup je uzavřen následnou validací navrhnutého konceptu elektrického pohonného ústrojí [28].

#### 4.3.2 POTŘEBNÉ ROVNICE A VELIČINY

Další částí práce je sestavení rovnice pro zrychlení vozidla v podélném směru, která zahrnuje výchozí parametry referenčního vozidla [28]:

$$\ddot{x} = \frac{1}{(e_i \cdot m_{veh} + m_{cargo})} \cdot \left[ \frac{T_{wheel}}{r_{dyn}} - (F_r + F_{cl} + F_{air}) \right], \quad (4.7)$$

kde:

$\ddot{x}$	[m·s <sup>-2</sup> ]	zrychlení vozidla v podélném směru,
$e_i$	[-]	koeficient hmotnosti ekvivalentní hmotnosti rotačních hmot,
$m_{veh}$	[kg]	hmotnost vozidla,
$m_{cargo}$	[kg]	hmotnost nákladu,
$T_{wheel}$	[N·m]	hnací moment na kolech,
$r_{dyn}$	[m]	dynamický poloměr kola,
$F_r$	[N]	valivý odpor,
$F_{cl}$	[N]	odpor stoupání,

$F_{\text{air}}$  [N] aerodynamický odpor.

Výpočet jednotlivých jízdních odporů je stejný jako v rovnicích (3.3), (3.4) a (3.5). Parametry, které jsou získány z referenčního vozidla či měření, jsou brány jako konstanty. Jedná se o zrychlení a rychlost vozidla, sklon vozovky a požadovaná nosnost. Ostatní parametry jsou modifikovatelné.

### 4.3.3 TVORBA JÍZDNÍHO PROFILU

Pro vytvoření adekvátního jízdního profilu je nutné postupovat podle následujících kroků:

- zaznamenat data z reálné jízdy referenčního vozidla,
- upravení a zpracování dat,
- vytvoření reprezentativních jízdních cyklů.

Pro nákladní automobily je dostačující, aby se vytvářený jízdní cyklus skládal ze závislosti rychlosti a výškového profilu (stoupání) na čase nebo ujeté vzdálenosti. Stoupání je možné určit pomocí několika metod. První možností je využití digitálních modelů reliéfu, například SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) od NASA, které zaznamenávají údaje o nadmořské výšce terénu ve vysokém rozlišení. Druhou možností je dopočet výškové polohy vozidla na základě naměřeného tlaku vzduchu, který je funkcí nadmořské výšky. Tento způsob není výpočetně náročný a nevyžaduje

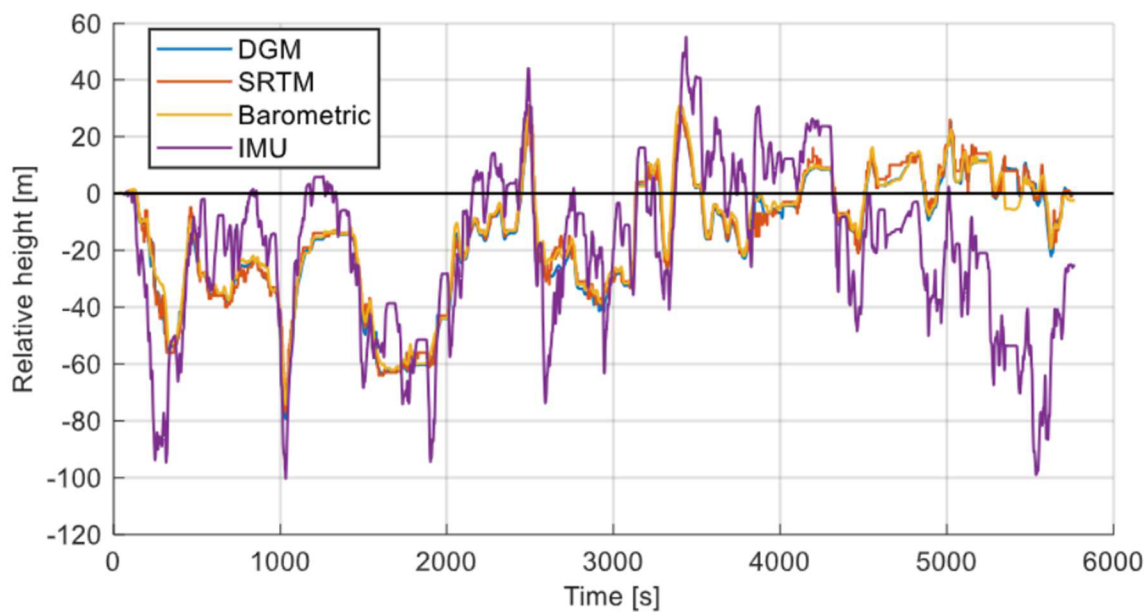
$$h_n = \frac{288,15}{0,0065} \cdot \left( 1 - \left( \frac{p(h_n)}{101325} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right), \quad (4.8)$$

kde:

$h_n$  [m] nadmořská výška,  
 $p(h_n)$  [Pa] tlak vzduchu funkcí nadmořské výšky.

Výsledné stoupání je následně dopočítáno z ujeté vzdálenosti a vypočtené nadmořské výšky. Další možností je využití inerciální měřicí jednotky (IMU – Inertial Measurement Unit) a následný dopočet stoupání z naměřené hodnoty zrychlení v podélném směru. Pro porovnání jednotlivých metod byl použit záznam okružní jízdy okolo města Cáchy a záznam vypočtených hodnot relativní nadmořské výšky vůči startovacímu bodu je na Obr. 16. Startovací pozice je shodná s cílovou, takže by počáteční a koncová hodnota relativní nadmořské výšky měla být nulová. První dva záznamy odkazují na digitální model reliéfu, kde DGM je databáze pouze pro území Německa a SRTM odkazuje na mezinárodní databázi. Zbylé dvě křivky jsou stanoveny pomocí barometrické metody a IMU.





Obr. 16 Relativní nadmořská výška určena pomocí různých metod [28]

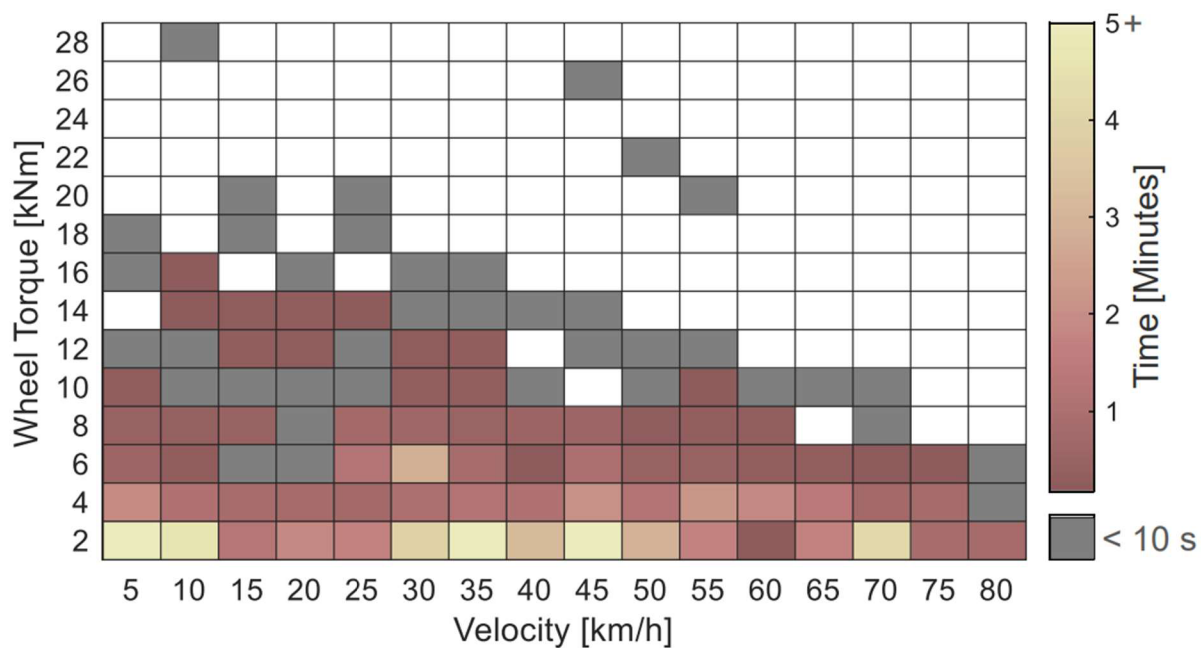
Při porovnání s daty z GPS je nej přesnější model DGM. DGM zaznamenává reliéf s přesností až na 1 cm (záleží na oblasti) a výsledná odchylka je 0,11 m. Oproti tomu u model SRTM s celkově díky nižší přesnosti záznamu dat vyšla odchylka 1 m. Nejméně přesný výpočet odpovídá IMU, kde odchylka dosahovala hodnot přes 25 m.

Generování jízdního cyklu může být docíleno více metodami. Autoři vybrali pro vytvoření rychlostního profilu a průběh stoupání v čase metodu Monte Carlo pomocí Markova řetězce (Markov chain Monte Carlo – MCMC). Tato metoda je určena pro simulaci složitých pravděpodobnostních rozdělání. Základem MCMC je odhad dalších stavů s určitou pravděpodobností, která je ovlivněna aktuálním stavem a cílovým rozdělením. S navyšujícím se počtem generovaných stavů se přesnost metody zvyšuje [31]. V problematice generování jízdního profilu jsou vytvořeny dva řetězce, které reprezentují hledané veličiny rychlost a stoupání. Oba řetězce jsou vzájemně propojeny čímž je eliminováno nereálné chování vozidla, jako je například nepřiměřený gradient rychlosti s narůstajícím stoupáním. Pro snížení výpočetní náročnosti jsou hodnoty obou veličin rozděleny do tříd po určitých intervalech. Jako cílové rozdělení pro MCMC jsou uvažovány průběhy z reálného měření. Stav v metodě MCMC je tedy reprezentován pomocí vzájemně závislých tříd rychlosti a stoupání. Pro stanovení pravděpodobnosti přechodu mezi jednotlivými stavy je použito Poissonovo rozdělení, které vychází z naměřených dat. Poissonovo rozdělení stanovuje četnost změny rychlosti, respektive stoupání, během časového úseku. Vytvořené cykly se následně porovnají s naměřenými daty a pomocí vhodných kritérií je vybrán nejvíce reprezentativní jízdní cyklus.

#### 4.3.4 SESTAVENÍ PROVOZNÍCH ZÁTĚŽÍ

Po vytvoření vhodného jízdního cyklu je možné začít s návrhem jednotlivých komponent hnacího ústrojí, jako je elektromotor, elektrické měniče a převodovka. Na základě vybraných parametrů referenčního vozidla jsou stanovovány zátěžové charakteristiky pro příslušné komponenty. Například pro návrh elektromotoru a převodovky je stěžejní stanovení krouticího momentu, který musí hnací ústrojí generovat a přenést na hnací kola vozidla. Ukázka rozložení

kroučícího momentu na hnacím kole v závislosti na rychlosti vozidla a s ohledem na časovou délku zatěžování v jednotlivých bodech je zobrazena na Obr. 17 a byla získána z vytvořeného jízdního cyklu. Po sestavení hrubého návrhu elektromotoru reflektující požadovaný točivý moment, rychlost otáčení a požadavky na rozměry jsou obdobným postupem navrženy ostatní komponenty. Po dokončení následuje fáze upravování komponent s ohledem na vyrobiteľnosť, životnosť, účinnosť, výrobné náklady či vzhľad.



Obr. 17 Rozložení zátěžových bodů získaných z vytvořeného jízdního cyklu - převzato z [28]

## 5 ZPRACOVÁNÍ DAT

Tato kapitola je zaměřena na popis postupu zpracování dat z plně elektrického vozidla, kategorie SUV, získaných během jízd v reálném provozu. Vybrané signály z měřicího ústrojí slouží primárně pro vytvoření vstupních parametrů do simulačního modelu podélné dynamiky vozidla v prostředí softwaru GT-SUITE (GT-SUITE™ v2023, Gamma Technologies, LLC., Westmont, IL). Dále jsou také využity pro odhad principu logiky řízení vybraných komponent.

### 5.1 MĚŘICÍ SOUSTAVA VE VOZIDLE

Jako výchozí vozidlo pro měření a vytvoření funkčního modelu podélné dynamiky je zvoleno plně elektrické bateriové vozidlo, dále pouze experimentální vozidlo. Vozidlo je poháněno synchronním elektromotorem s permanentními magnety (PMSM – Permanent magnet synchronous motor) o výkonu 132 kW a točivým momentem 310 Nm, který je umístěný na zadní nápravě. Trakční Li-Ion baterie o kapacitě 62 kWh je umístěna v rámu v podlaze vozidla.

O záznam dat z CAN komunikace vozidla je vozidlo osazeno měřicí technikou od firmy imc Test & Measurement GmbH. Celá aparatura je umístěna v zavazadlovém prostoru vozidla. Hlavní část tvoří ústředna řady BUSDAQflex – 8, která disponuje čtyřmi vstupy pro CAN komunikaci a vstupem pro připojení GPS. Její pracovní rozsah teplot je od -40 °C po 85 °C a plně tedy vyhovuje podmínkám pro měření na území České republiky. Propojení vozidla s ústřednou je realizováno ze čtyř řídicích jednotek: CAN komfortní výbavy, CAN hlavní řídicí jednotky, CAN elektrického pohonu a CAN jízdních asistentů.

Pro maximální komfort uživatele vozidla je měření spouštěno automaticky s připojením napětí na terminál 15. Přenos datových záznamů a jejich uložení na datová uložiska je zajištěn routerem Teltonika RUT240. Měřicí soustava je zobrazena na Obr. 18.



Ústředna BUSDAQflex-8

Router Teltonika RUT240

Obr. 18 Měřicí soustava ve vozidle



## 5.2 VYBRANÉ NAMĚŘENÉ ZÁZNAMY

Pro vytvoření vstupních parametrů pro model v GT-SUITE bylo vybráno celkem 33 záznamů jízd s experimentálním vozidlem. Záznamy byly vybrány tak, aby zaznamenaná data pokrývaly co největší rozsah běžných provozních podmínek – z hlediska SoC, rychlostních profilů, venkovní teploty atd. Jízdy probíhaly v městském, mimoměstském i dálničním provozu. V Tab. 3 níže jsou uvedeny shrnující parametry ze všech záznamů.

Datové záznamy byly ukládány ve formátu „dat“ softwaru imc FAMOS (imc FAMOS Enterprise 2023, imc Test & Measurement GmbH, Berlin). Zpracování dat však probíhalo v softwaru MATLAB (MATLAB R2023a, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts). Pro automatický export vybraných signálů ze všech jízd byl vytvořen skript, který rozdělil jednotlivé signály do samostatných skupin (pro elektromotor, baterii,...) a následně je exportoval do formátu „xlsx“, odkud byly importovány do prostředí softwaru MATLAB.

Tab. 3 Celkové údaje z vybraných záznamů

### Celkové údaje ze všech záznamů

Počet záznamů	[-]	33
Celkový čas	[min]	2237
Ujetá vzdálenost	[km]	2753
Jízda do 50 km·h <sup>-1</sup>	[%]	35,7
Jízda 50 ÷ 90 km·h <sup>-1</sup>	[%]	23,8
Jízda nad 90 km·h <sup>-1</sup>	[%]	40,5
Stav nabití baterie (palubní počítač)	[%]	2,5 ÷ 100
Venkovní teplota	[°C]	-2,5 ÷ 20

## 5.3 ELEKTROMOTOR

Elektromotor je hlavní část pohonného ústrojí plně elektrického vozidla. Dochází zde k přeměně elektrické energie, dodávaného z trakční baterie, na mechanickou práci. Elektromotor typu PMSM je založený na interakci dvou magnetických polí. Rotující magnetické pole, vytvořené na statorové části motoru pomocí střídavého proudu protékajícím třífázovým vinutím, unáší s sebou magnetické pole vytvořené permanentními magnety na rotoru motoru. Řízení motoru následně probíhá ve střídači, kde dochází ke změně stejnosměrného proudu na střídavý a výstupní proud je regulován pomocí pulzně šířkové modulace (PWM – Pulse width modulation).

Prvotním cílem bylo vytvořit účinnostní mapu samostatně pro elektromotor a střídač, ale z důvodu absence záznamu signálu střídavého proudu v jednotlivých vinutích bylo rozhodnuto o vytvoření účinnostní mapy pro obě komponenty dohromady. Pro výpočet mechanického a elektrického výkonu a následně i účinnosti elektromotoru v jednotlivých naměřených bodech je zapotřebí signál okamžitých otáček a točivého moment motoru, napětí a elektrického proudu přiváděného na svorky elektromotoru. Jednotlivé signály a jejich vlastnosti uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Vybrané vstupní signály pro vytvoření účinností mapy

Veličina	Jednotka	Vzorkovací frekvence [Hz]	Přesnost
Otáčky	min <sup>-1</sup>	20	± 0,5
Točivý moment	N·m	20	± 0,25
Napětí	V	20	± 0,125
Proud	A	20	± 0,25
Max točivý moment	N·m	20	± 0,5
Min točivý moment	N·m	20	± 0,5

Ze vstupních dat byly vyfiltrovány hodnoty, kdy otáčky elektromotoru nabývaly záporných hodnot, protože pro potřeby modelu v GT-SUITE dostačují pouze kladné hodnoty. Mechanický výkon se určí následovně:

$$P_{mech} = M_t \cdot \omega_m, \quad (5.1)$$

$$P_{mech} = M_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_m}{60},$$

kde:

$P_{mech}$	[W]	mechanický výkon,
$M_t$	[N·m]	točivý moment elektromotoru,
$\omega_m$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost elektromotoru,
$n_m$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky elektromotoru.

Elektrický výkon byl vypočten na základě hodnot signálu napětí a stejnosměrného proudu na vstupních svorkách elektrického střídače podle následujícího vztahu:

$$P_{el} = U_{st} \cdot I_{st}, \quad (5.2)$$

kde:

$P_{el}$	[W]	elektrický výkon,
$U_{st}$	[V]	napětí na vstupu do střídače,
$I_{st}$	[A]	stejnoseměrný proud na vstupu do střídače.

Tímto způsobem proběhl výpočet pro všechny naměřené body ve všech 33 záznamech. Ukázka vypočteného elektrického a mechanického výkonu pro jednu z jízd je zobrazena na Obr. 19. Na základě znaménka hodnoty proudu je vypočtena výsledná účinnost elektromotoru a střídače. Záporná hodnota proudu značí generátorický režim elektromotoru, tedy kdy kola vozidla roztáčejí rotor elektromotoru a dochází k rekuperaci energie. V tomto případě je vztah pro výpočet účinnosti následující:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}}, \quad (5.3)$$

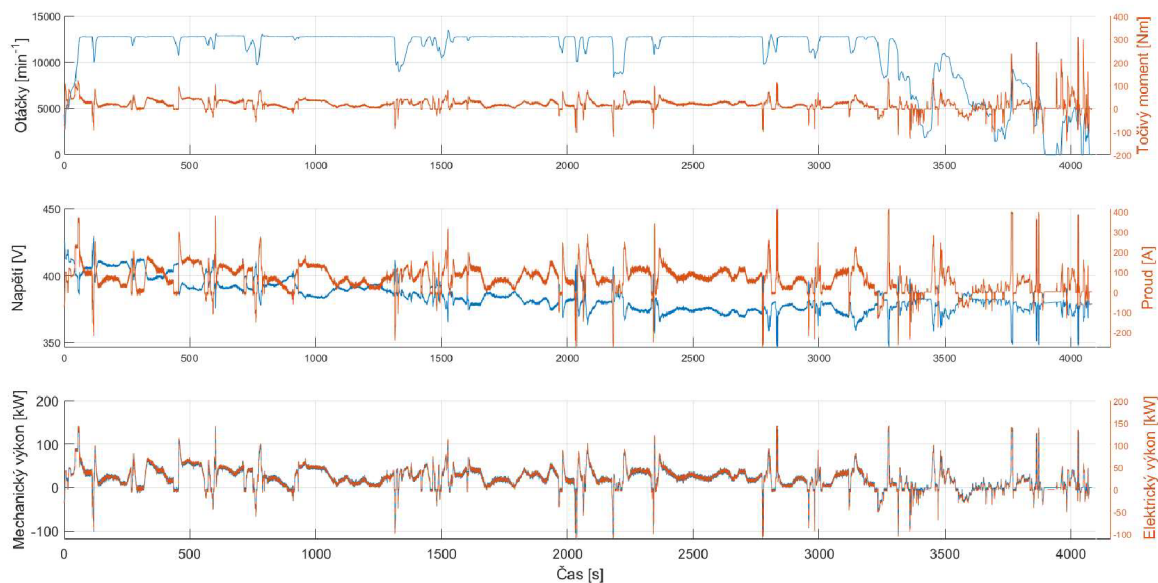
kde:

$\eta$  [-] společná účinnost elektromotoru se střídačem.

V případě, že jsou hodnoty proudu kladné, nachází se elektromotor v motorovém režimu, elektrický proud směřuje z trakční baterie do elektromotoru a účinnost se určí podle vztahu:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \quad (5.4)$$

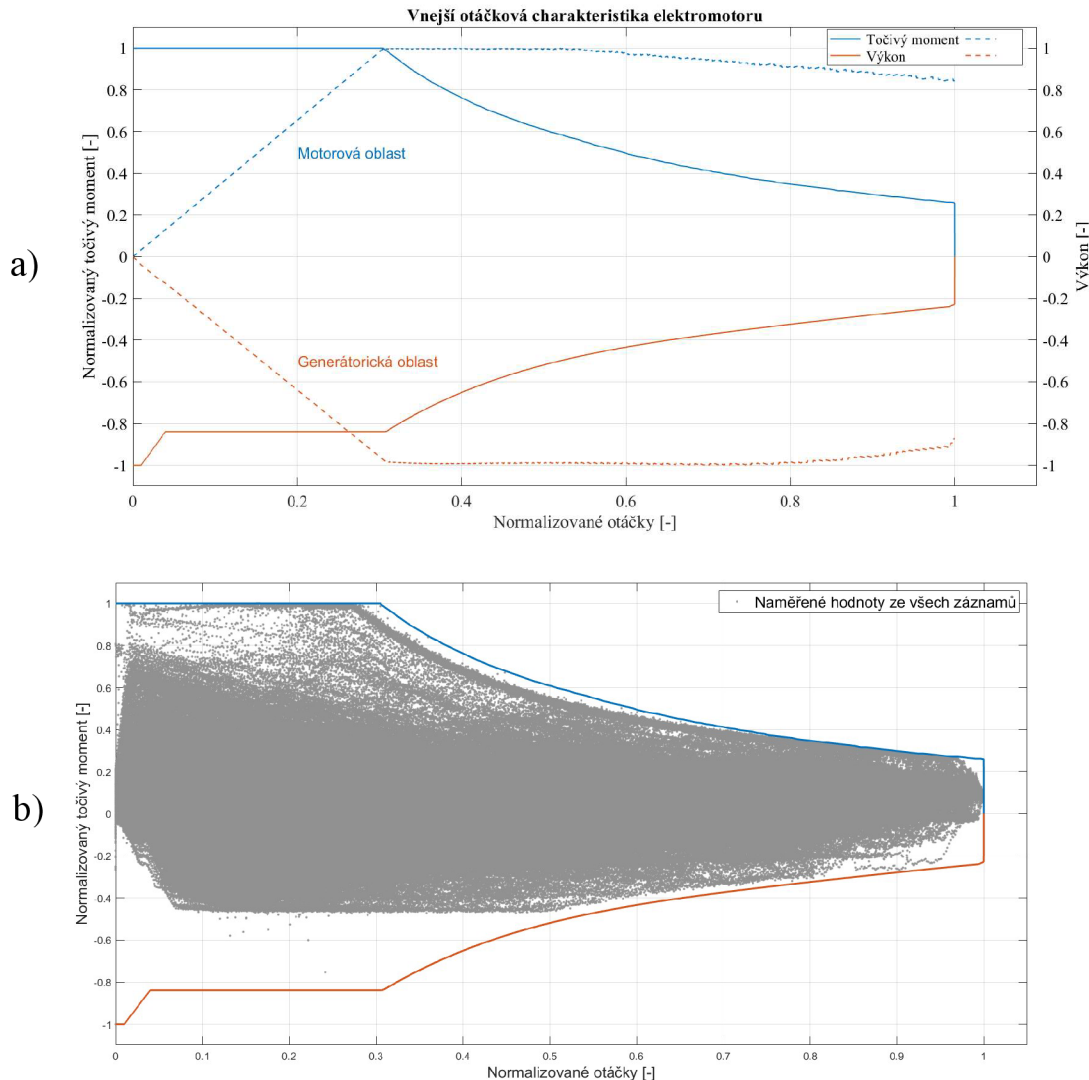
Jako opatření proti možnému dělení nulou je nastavena podmínka, že pokud alespoň jedna hodnota ze všech čtyř veličin bude nabývat hodnoty rovnou nule, výsledná účinnost v tomto naměřeném bodě bude také nulová. Pro některé naměřené body v motorické oblasti (kladné hodnoty proudu) nabýval točivým momentem záporných hodnot  $-0,5 \text{ N}\cdot\text{m}$  a výsledná účinnost vycházela záporná. Tento jev je způsobený přetáčivými ztrátami, kdy je potřeba dodávat elektrickou energii, aby si motor udržel nulový až či mírně záporný moment. Tyto hodnoty účinnosti byly s kladným znaménkem dále uvažovány při tvorbě mapy účinnosti.



Obr. 19 Průběh veličin pro vybranou jízdu

Dále také vlivem různé velikosti přesnosti snímání jednotlivých veličin docházelo k vychýlení hodnot účinnosti mimo interval nula až jedna. Data byla ponechána a zpracována v pozdější pracovní operaci. Jako další bylo zapotřebí získat vnější otáčkovou charakteristiku elektromotoru pro generátorickou i motorovou oblast. Hodnoty vstupních signálů maximálního a minimálního limitního točivého momentu jsou ovlivňovány řídicí jednotkou převážně na základě signálů SoC a teploty trakční baterie. Proto byly signály filtrovány a získány maximální, respektive minimální limitní hodnoty točivého momentu v závislosti na otáčkách elektromotoru. Výsledné charakteristiky jsou normalizovány vůči maximálním a minimálním

hodnotám, aby nedošlo k vyzrazení citlivých údajů průmyslového partnera Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Výsledné křivky jsou zobrazeny na Obr. 20 a).



Obr. 20 a) Normalizovaná vnější otáčková charakteristika elektromotoru b) Rozložení naměřených bodů v závislosti na otáčkách a točivém momentu motoru

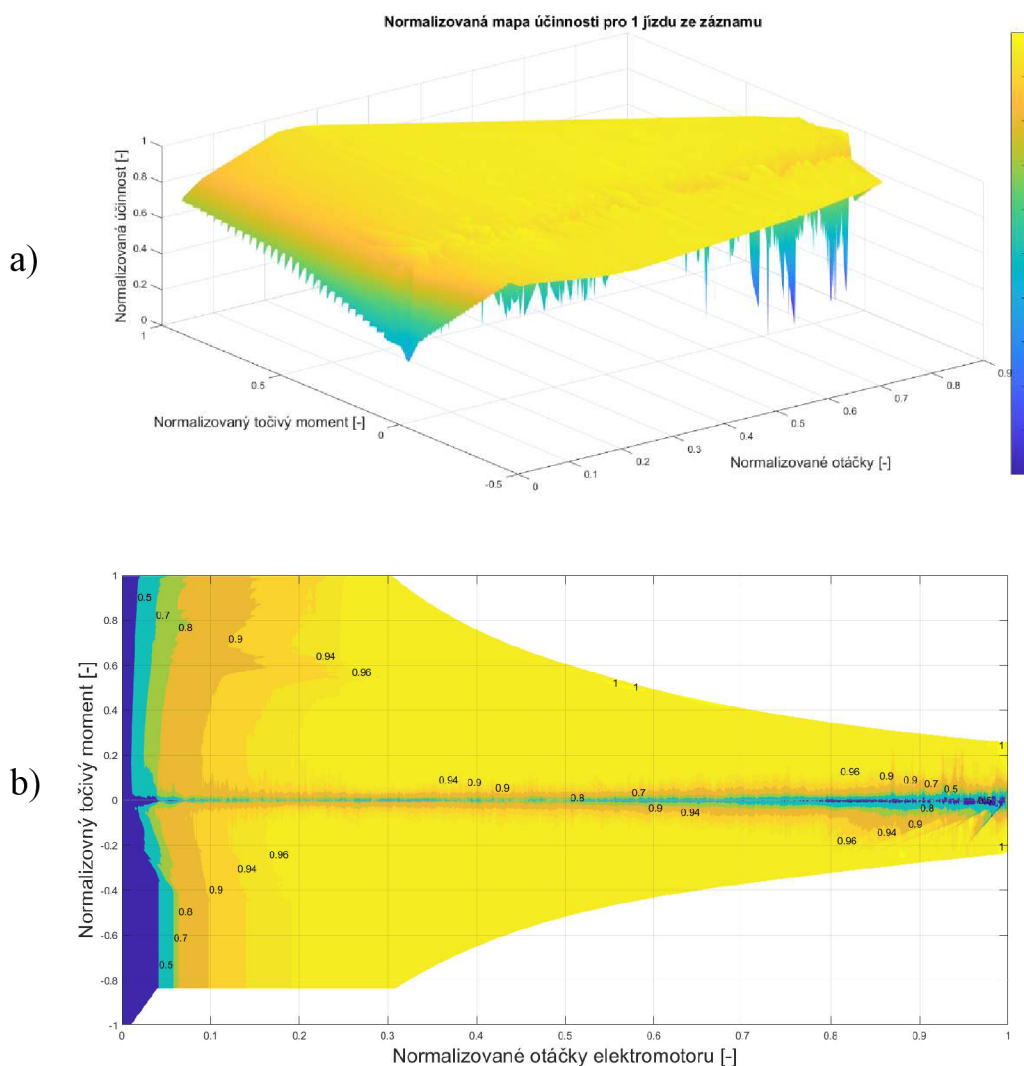
Po určení limitních hodnot otáček a točivého momentu motoru byla vytvořena síť pro interpolaci vypočtených hodnot účinnosti motoru. Na ose x byly odstupňovány otáčky motoru od 0 až po maximální hodnotu s krokem  $10 \text{ min}^{-1}$  a pro přesnější odhad byla síť zjemněna pro oblast 0 až 5 otáček, kde byl zvolený krok po  $1 \text{ min}^{-1}$ . Obdobně byla sestrojena osa y s točivým momentem, který byl odstupňován po  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$  a v oblasti od  $-5$  po  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$  byl zvolen poloviční krok. Následně byla pomocí interpolační funkce „griddata“ vytvořena pro každou zaznamenanou jízdu interpolovaná mapa účinnosti. Ukázka vybrané mapy je na Obr. 21 a). Při interpolaci byla zvolena lineární metoda, která je založena na principu Delaunayovy trinagulace. Pro vytvoření jednotné účinnostní mapy byl zvolen přístup váženého průměrování podle následujícího vzorce:

$$\bar{\eta}_{i,j} = \frac{\sum w_{i,j,k} \cdot \eta_{i,j,k}}{\sum w_{i,j,k}}, \quad (5.5)$$

kde:

$w_{i,j,k}$  [-] koeficient váhy v daném bodě mřížky a k-tém záznamu jízdy,  
 $\eta_{i,j,k}$  [-] účinnost v daném bodě mřížky a k-tém záznamu jízdy.

Matice koeficientů váh pro jednotlivé body byla sestavena na základně vypočtené účinnosti v naměřených bodech, kdy pro účinnost v intervalu od nula do jedna byla přiřazena váhovému koeficientu hodnota 1, pro hodnoty účinnosti mimo tento interval byl váhový koeficient nastaven na 0.01. Tímto způsobem se se eliminovaly hodnoty s účinností nad 100 %. Následně bylo nutné doplnit chybějící hodnoty převážně v okolí maximální zátěže v generátorické oblasti pro nižší otáčky, kde nebylo naměřeno dostatek bodů (viz Obr. 20 b) ). Hodnoty účinnosti zde byly nahrazeny posledními dostupnými hodnotami z generátorické oblasti.



Obr. 21 a) Normalizovaná mapa účinnosti pro vybranou jízdu b) Výsledná normalizovaná mapa celkové účinnosti pro elektromotor a střídač

Výsledná mapa po všech úpravách je zobrazena na Obr. 21 b). Je vidět, že pro pásmo v oblasti otáček elektromotoru blízké nule a zároveň při hodnotách točivého momentu blízkých nule se celková účinnost pohybuje do 60 % vůči maximální dosažené účinnosti. Naopak s nejmenšími ztrátami je motor provozován za oblastí s konstantním maximálním točivým momentem, tedy při středních otáčkách a momentové zátěži. Obecně se na účinnosti elektromotoru a střídače podílí více faktorů. Hřídel rotoru motoru je uložený na ložiscích, kde dochází k mechanickým ztrátám vlivem tření. Další ztráty vznikají ve vinutí statoru, kde je ztrátová energie odváděna ve formě tepla a velikost ztrátového výkonu se mění s druhou mocninou proudu. V neposlední řadě vznikají ztráty při interakci magnetických polí, kdy se změnou magnetického pole indukuje proud v rotoru (vířivé proudy).

## 5.4 BATERIE

Trakční baterie představuje ústřední prvek plně elektrického vozidla, který slouží jako zdroj energie pro pohonný systém vozidla a pomocné a palubní systémy. Pojmeme baterie (battery pack) je u EV často označována sestava bateriových článků včetně regulačních systémů. Základem baterie je nosný ochranný rám, často hliníkový, ve kterém jsou uloženy bateriové moduly s jednoduchými bateriovými články. Podle typu zapojení článků v modulech a následném propojení bateriových modelů mezi sebou je určeno výsledné napětí a kapacity celé baterie. Běžně se u EV setkáme s napěťovými systémy okolo 400 V (např. Hyundai Kona Electric, Škoda Enyaq, Kia Niro EV, Volkswagen e-Golf), trendem však u většiny výrobců je přechod na 800 V systémy (např. Porsche Taycan, Hyundai Ioniq 5, Tesla Cybertruck). Dokonce výrobce Lucid představil model Air, u kterého deklaruje napětí přes 900 V.

Základní model baterie je možné vytvořit na základně počtu bateriových článků a informací ohledně jejich sériového a paralelního uspořádání. Výsledné napětí je pak dáno součinem počtu sériově zapojených článků a jejich napětím, celková kapacita je pak součin kapacity článků s počtem paralelně zapojených článků. Druhou možností je modelovat baterii jako celek. Pro model v GT-SUITE bylo klíčové určení závislosti tzv. napětí na prázdko (OCV – Open circuit voltage), stavem nabití a teplotou baterie při dobíjení a vybíjení baterie. K tomu odpovídající závislost vnitřního odporu baterie také na SoC a teplotě baterie.

Tab. 5 Vybrané vstupní signály pro zpracování dat pro modelování baterie

Veličina	Jednotka	Vzorkovací frekvence [Hz]	Přesnost
SoC	-	10	± 0,025
Napětí baterie - $U_{bat}$	V	100	± 0,125
Proud baterie - $I_{bat}$	A	100	± 0,05
Teplota baterie - $T_{bat}$	°C	2	± 0,25
Energie při vybíjení - Dis	W·s	20	± 5
Energie při nabíjení - Char	W·s	20	± 5

Prvotním cílem bylo získat dané charakteristiky z naměřených dat pro jeden bateriový článek a následně je využít pro zbylé články. Z CAN komunikace byly dostupné záznamy průběhu napětí a teploty pro každý druhý bateriový článek. Nicméně vzorkovací frekvence napětí článku a proudu baterie se lišila téměř 20násobně, bylo rozhodnuto, že se baterie bude modelovat jako celek, tedy přes napětí, teplotu, proud a stav nabití celého battery packu. Veškeré potřebné signály jsou uvedeny v Tab. 5.

K modelování baterie a určování OCV v závislosti na SoC existuje mnoho přístupů a metod výpočtu. Základem je vytvoření Thaveninova modelu baterie alespoň s jednou paralelní RC větví, kde napětí na zdroji je hledané OCV, sériově zapojený rezistor s odporem  $R_0$  představuje vnitřní odpor baterie a paralelní větev s kondenzátorem o kapacitě  $C_1$  a rezistorem s odporem  $R_1$  je pro zahrnutí přechodných dějů baterie při vybíjení a nabíjení. Proud  $I_{bat}$  v obvodu je rovný proudu v baterii a napětí  $U_{bat}$  je měřené výstupní napětí na svorkách baterie. Schéma elektrického obvodu je na Obr. 22. Rovnice pro popsání dějů v obvodu Thaveninova modelu baterie s jednou RC jsou zobrazeny níže:

$$\dot{U}_1 = -\frac{1}{C_1 \cdot R_1} \cdot U_1 + \frac{1}{C_1} \cdot I_{bat}, \quad (5.6)$$

$$U_{bat} = OCV - U_1 - I_{bat} \cdot R_0$$

kde:

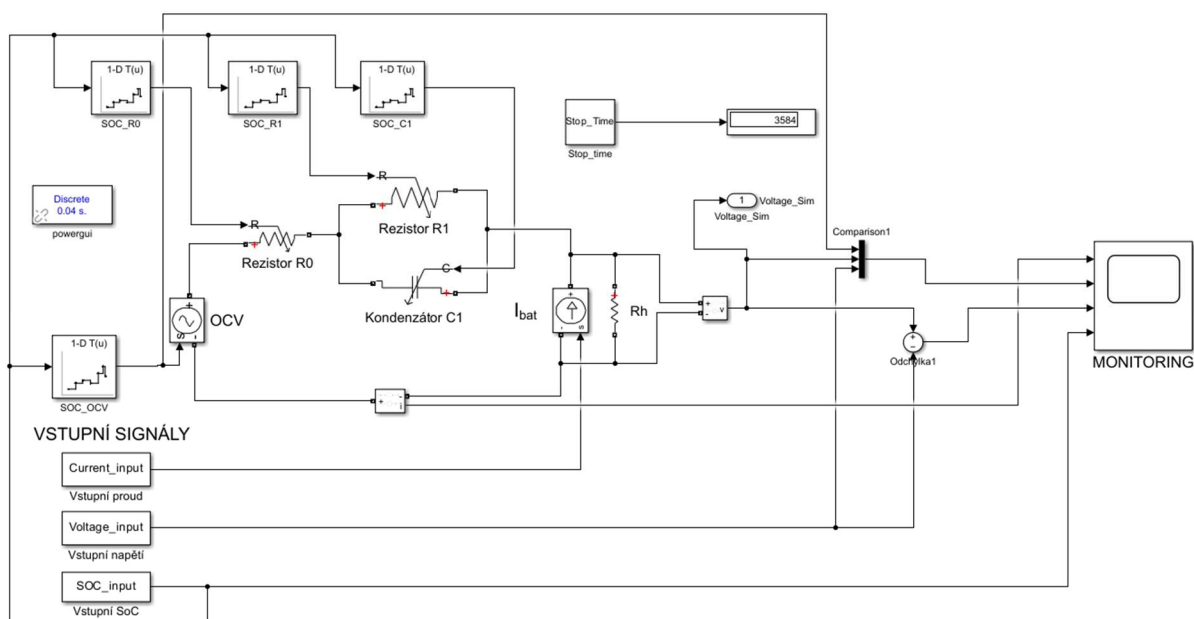
$U_1$	[V]	úbytek napětí na RC větví,
$C_1$	[F]	kapacity kondenzátoru $C_1$ v RC větví,
$R_1$	[Ohm]	odpor na rezistoru $R_1$ v RC větví,
$I_{bat}$	[A]	proud v obvodu,
$U_{bat}$	[V]	výstupní měřené napětí na svorkách,
OCV	[V]	napětí na zdroji,
$R_1$	[Ohm]	odpor na sériovém rezistoru $R_1$ .

Jelikož závislost parametrů baterie na SoC není lineární, využívají se nelineární optimalizace nejmenších čtverců. Například autoři v [32], [33] použili pro odhad parametrů adaptivní filtr v podobě rekurzivní metody nejmenších čtverců (RLS – Recursive least squares algorithm), který vychází z Kalmanova filtru. Další modifikace v podobě přidání faktoru exponenciálního zapominání k RLS s jedním či více faktory je u autorů [34], [35], [36] a [37].

Pro odhad parametrů OCV,  $R_0$ ,  $R_1$  a  $C_1$  bylo nutné nejprve rozlišit u vstupních naměřených signálů  $U_{bat}$  a  $I_{bat}$ , zda se jedná o nabíjení či vybíjení baterie. K tomu byly využity signály odvedené, respektive dodané, energie s označením Dis, respektive Char z Tab. 5. Pokud dochází k vybíjení, hodnoty signálu Dis se mění a hodnoty Char zůstávají konstantní. Oba signály byly numericky derivovány a na základě vyšší hodnoty derivovaných signálů byly rozříděny veličiny SoC,  $U_{bat}$ ,  $I_{bat}$  a  $T_{bat}$  do dvou skupin.

Skupina nabíjení i vybíjení, která každá obsahuje samostatné záznamy ze všech 33 jízd, byla následně rozdělena do dalších pěti podskupin podle teploty baterie. Podle charakteru jízdy a venkovní teploty neobsáhl vždy záznam z jízdy všech pět teplotních intervalů, a tak celkově vzniklo 146 rozříděných souborů, u kterých bylo potřeba učinit odhad parametrů baterie.





Obr. 22 Thaveninův model baterie v prostředí MATLAB Simulink pro odhad parametrů baterie

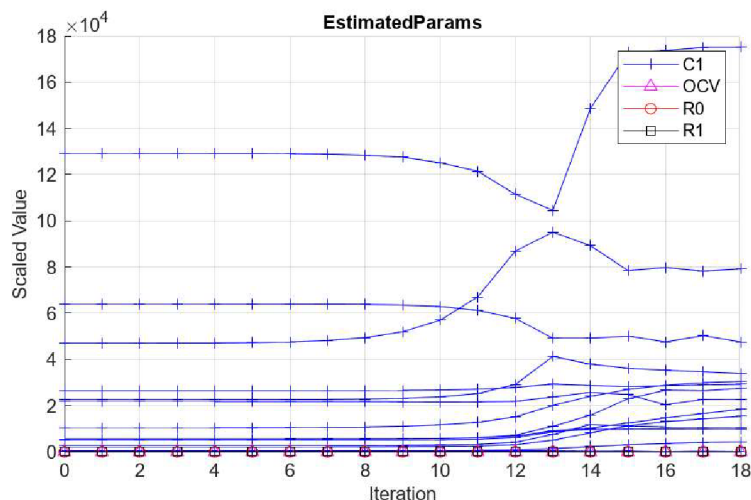
V prostředí softwaru MATLAB Simulink byl vymodelován model baterie podle Thaveninova modelu s jednou paralelní RC větví. Pro simulaci průběhu proudu z měření  $I_{bat}$  byl využit prvek „Controlled Current Source“, který generuje stejnosměrný proud na základě vstupního signálu. Pro napěťový zdroj OCV byl vybrán prvek „Controlled Voltage Source“, který opět generuje stejnosměrné napětí na základě vstupního signálu. Rezistory  $R_0$  a  $R_1$  byly modelovány pomocí prvku „Variable Resistor“ a kondenzátor  $C_1$  pomocí „Variable Capacitor“, které mění hodnotu odporu a kapacity dle vstupního signálu. Z důvodu kolize mezi prvky „Variable Resistor“ a „Controlled Current Source“, které se chovají v obvodu jako dva samostatné proudové zdroje, musel být do obvodu přidán přídatný rezistor  $R_h$ , který je zapojený paralelně s Controlled Current Source“ a jeho hodnota odporu byla nastavena na 1 GigaOhm, aby neovlivňoval průběhy napětí a proudu v obvodu. Napětí na svorkách obvodu je měřeno pomocí voltmetru a porovnáváno s naměřeným napětím z experimentálního vozidla.

Proměnlivost jednotlivých parametrů v závislosti na SoC je reflektována v přidávaných vyhledávacích tabulek (SOC\_OCV, SOC\_R0, SOC\_R1, SOC\_C1), do kterých je přiváděn signál SoC z experimentálního vozidla a na jeho základě jsou vybírány příslušně hodnoty parametrů. U vyhledávacích tabulek byla nastavena interpolační metoda „Nearest“, která skokově mění výstupní hodnotu.

Pro odhad parametrů byl využit nástroj Parameter Estimator softwaru MATLAB. V Parameter Estimator byla vybrána metoda nelineární optimalizace nejmenších čtverců (Nonlinear least squares) a algoritmus byl zvolený Trust-Region-Reflective. Algoritmus je robustní a zvládá řešit i špatně podmíněné modely. Optimalizace funguje na principu hledání minima účelové funkce, která v tomto modelu představuje rozdíl mezi simulovaným napětím na svorkách a napětím z měření. Jako účelová funkce byl vybrán součet čtverců reziduí (Sum of Squared Errors). U nastavení optimalizačních možností byla nastavena hodnota tolerance parametru i tolerance funkce na 0.001. Toto nastavení určuje maximální přípustnou relativní změnu hodnoty odhadovaných parametrů, respektive účelové funkce mezi jednotlivými iteracemi.

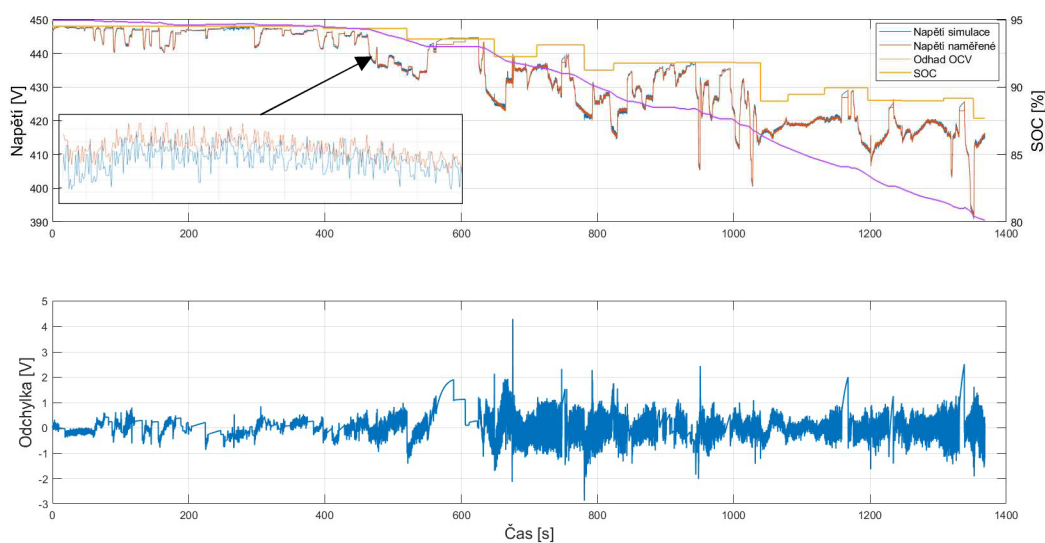


Vždy pro vybranou rozříděnou skupinu (například vybíjení a teplota od 20 do 25 °C) byly vytvořeny vstupní naměřené signály v závislosti na čase. Podle rozsahu SoC vybrané skupiny naměřených hodnot byly vytvořeny vektory počátečních hodnot parametrů OCV,  $R_0$ ,  $R_1$  a  $C_1$  pro optimalizaci. Pro zjednodušení byla závislost na SoC odstupňována po celých procentech. Tedy na každou celočíselnou hodnotu SoC v procentech je potřeba stanovit jednu inicializační hodnotu odhadovaného parametru. Nejprve byly provedené hrubé odhady, následně byly využívány jako počáteční hodnoty data, z již optimalizovaných parametrů.



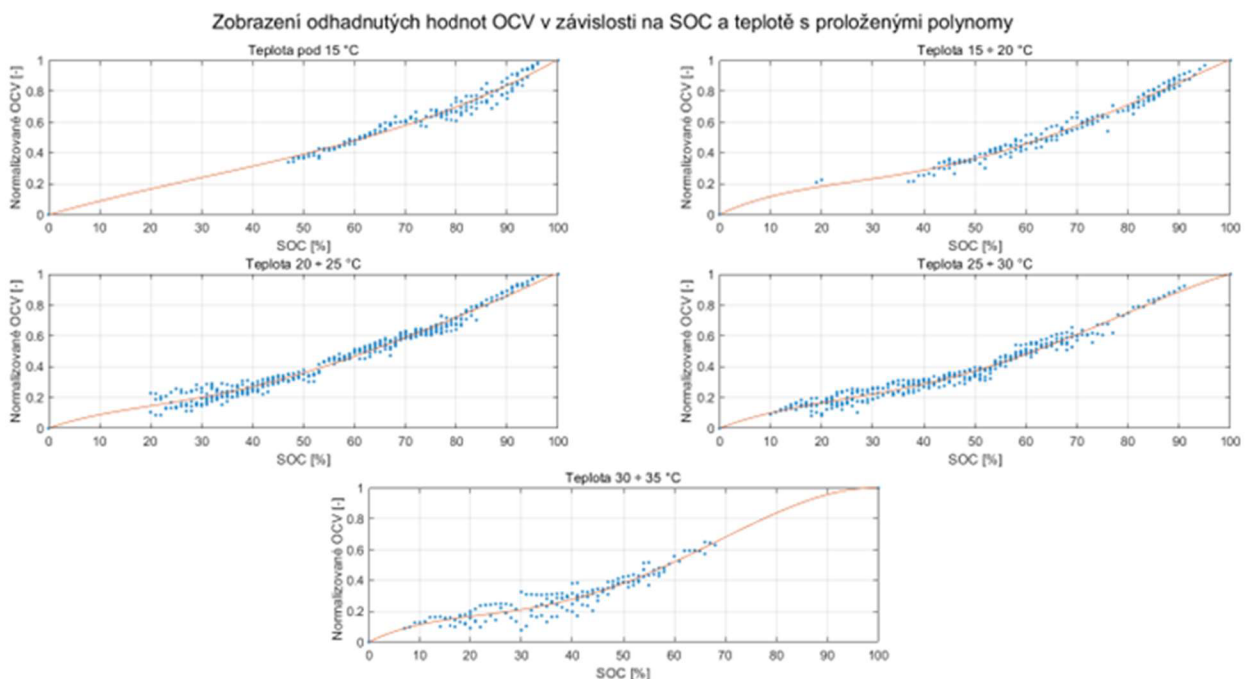
Obr. 23 Průběh optimalizace parametrů baterie v Parameter Estimator

Tímto způsobem byly optimalizovány parametry pro všech 146 rozříděných souborů naměřených dat. Maximální odchylky mezi simulovaným a měřeným napětím dosahovaly  $\pm 5$  V. Na Obr. 24 je možné vidět průběhy obou napětí i jejich odchylky společně s odhadnutou hodnotou OCV a průběhem SoC pro záznam z jedné z jízd při vybíjení a teplotě baterie v rozmezí 15 až 20 °C.



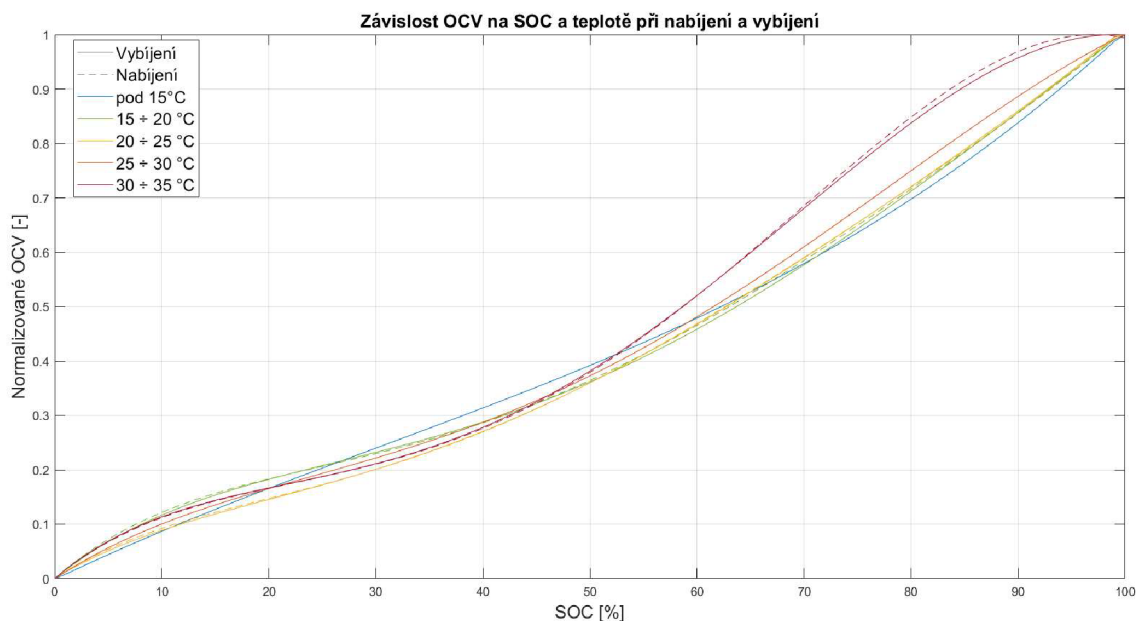
Obr. 24 Průběhy simulovaného a měřeného napětí společně s průběhem OCV a SoC po odhadu parametrů

Pro potřeby modelu v GT-SUITE byly následně zpracovány pouze hodnoty OCV a vnitřního odporu  $R_0$ . Získané hodnoty byly sloučeny do jednoho souboru a vykresleny v závislosti na SoC pro jednotlivé rozsahy teplot (viz Obr. 25). Hodnoty OCV vykazovaly očekávanou závislost. Při zpracování dat byl využíván signál o stavu nabití baterie přímo z BMS, který se liší oproti hodnotě zobrazované uživateli na palubním počítači, chyběly vždy okrajové hodnoty blízké plnému stavu nabití a úplnému vybití baterie. Horní hranice OCV se určila ze signálu maximálního dovoleného napětí v baterii. Při nabíjení je povolené přesáhnout tuto hodnotu o 9 V. Pro spodní hranici SoC byl také dostupný signál konstantní hodnoty minimálního napětí baterie, ale tato hodnota nemohla být použita, protože určuje hranici minimálního napětí při maximálním proudu v baterii. Pro SoC rovno nulové hodnotě byl učiněn odhad hodnoty OCV na základě průběhu posledních odhadnutých hodnot OCV. Z hlediska velikosti chyby je tento krok poměrně zanedbatelný, protože pro model v GT-SUITE je možné obdobně jako je to v reálném vozidle nastavit minimální hranici SoC, kdy dojde k přerušení simulace a nahlášení vybité baterie.



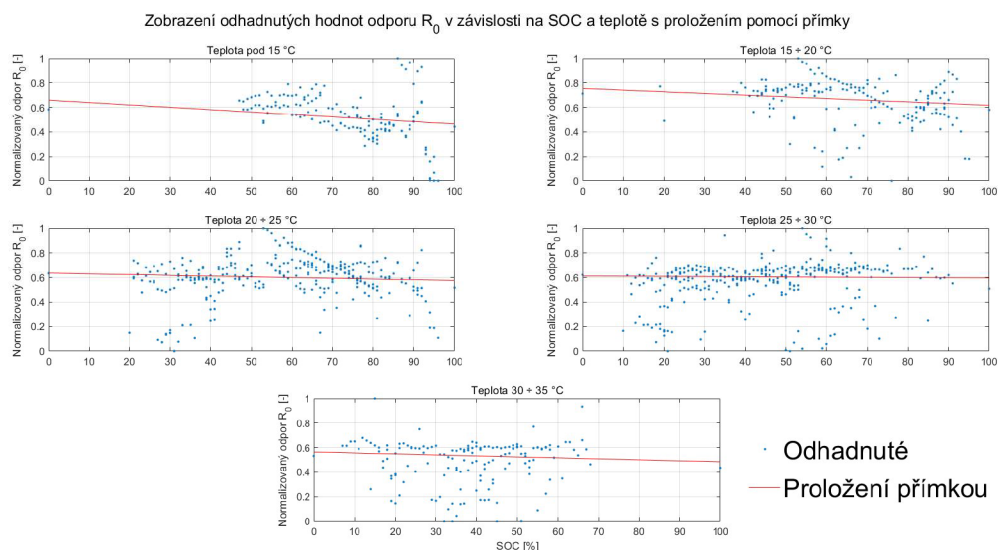
Obr. 25 Normalizované hodnoty OCV při vybíjení, získané po optimalizaci v Simulinku, proložené polynome

Po přidání odhadnutých hodnot v krajních bodech SoC byly jednotlivé body proloženy polynomy 5. stupně pomocí funkcí „polyval“ a následně vykresleny v celém rozsahu SoC pomocí funkce „polyfit“. Obdobně proběhlo zpracování dat i pro stav nabíjení a výsledné závislosti OCV na SoC jsou zobrazeny na Obr. 26. Výsledné charakteristiky jsou normalizovány vůči maximálním a minimálním hodnotám, aby nedošlo k vyzrazení citlivých údajů průmyslového partnera Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Nakonec však bylo rozhodnuto, že pro potřeby modelu elektrického vozidla v GT-SUITE budou využity pouze dva rozsahy, a to pro teploty od 20 po 30 °C. Důvodem by je absence dat ve velkém rozsahu SoC u zbylých teplotních intervalů a hodnoty získané pomocí proložení dat polynomy by mohly vnášet chyby do modelu elektrického vozidla.



Obr. 26 Výsledné normalizované průběhy OCV - SoC pro jednotlivé teploty při nabíjení a vybíjení

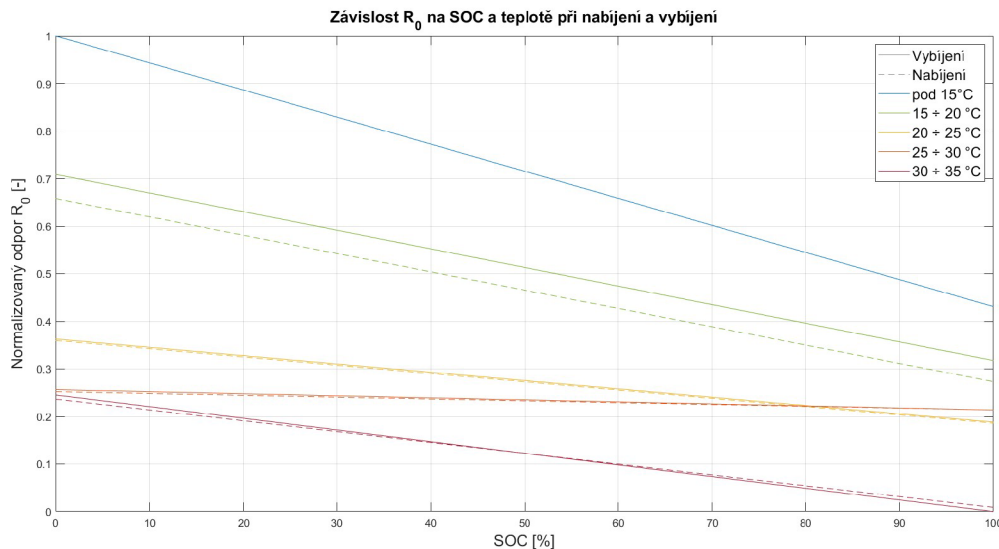
Při zpracování dat vnitřního odporu  $R_0$  byly opět odhadnuté hodnoty sloučeny do jednoho souboru podle teplotního intervalu. Rozdělení hodnot v závislosti na SoC však nebylo nijak strukturované a neodpovídalo očekávaným výsledkům. Proto zde byla použita pouze lineární regrese.



Obr. 27 Normalizované hodnoty odporu  $R_0$  při vybíjení, získané při optimalizaci v Simulinku, proložené přímkou

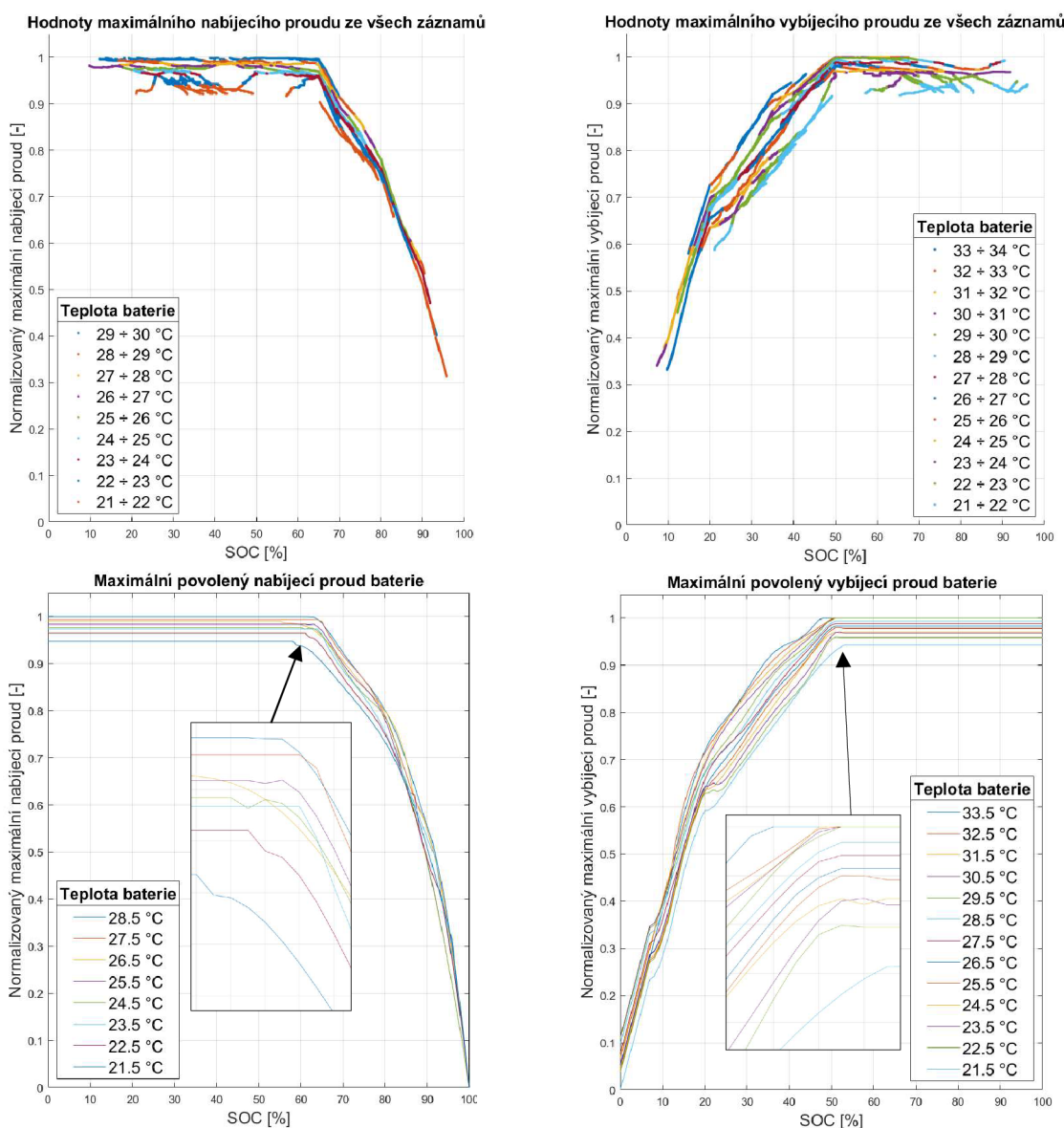
Získané hodnoty lineární regrese pro vybíjení jsou zobrazeny na Obr. 27. Obdobně jako u OCV jsou z pěti teplotních intervalů využity pouze dva a všechny získané křivky pro vybíjení i nabíjení jsou zobrazeny společně na Obr. 28, kde pro teplotu pod 15 °C vyšly identické hodnoty.

Poslední částí při zpracování dat pro model baterie bylo nalezení křivek maximální povoleného proudu při nabíjení a vybíjení baterie. Limitní křivky proudu jsou stanovovány s ohledem na maximální požadovaný výkon při vybíjení a dobíjení baterie, životnost baterie a zatížitelnost



Obr. 28 Výsledné normalizované průběhy  $R_0$  - SoC pro jednotlivé teploty při nabíjení a vybíjení

vodičů. Dále je také nutné brát ohled na výkon chladicího systému, aby byl schopný udržet provozuschopnou teplotu baterie při provozu na maximální zátěž. Omezení maximálního proudu je závislé na SoC a teplotě baterie. Vstupní signály maximálních proudů baterie byly nejprve sloučeny ze všech záznamů do společného souboru a poté byly rozčleněny podle teploty baterie po 1 °C. Následně byly vyneseny do grafu závislosti maximálního proudu na SoC. Poté byly vybrány intervaly teplot, kde byl dostatek dat pro proložení polynomem. Polynomiální regrese byla provedena po částech, tak aby co nejlépe vystihla průběh maximálního proudu při nabíjení a vybíjení. Při vybíjení bylo nutné extrapolovat chybějící data v oblasti pod 10 % SoC. Zde byly využity polynomy prvního a druhého stupně s obdobným gradientem jako naměřená data v oblasti mezi 10 a 20 % SoC. Podobně bylo potřeba extrapolovat data i pro nabíjecí křivky pro oblast SoC 96 % a více. Stejně jako u odhadování hodnot OCV pro nízké hodnoty SoC, tak i zde vyšší odchylka vlivem extrapolace dat v krajních oblastech nepředstavuje zásadní chybu, protože v těchto oblastech je uživateli zobrazen stav plně vybité, respektive plně nabitě baterie a ochranný systém baterie neumožňuje dále baterii vybit, respektive nabíjet. Stejnou logiku řízení baterie je možné zahrnout i do modelu v GT-SUITE. Jednotlivé průběhy povoleného maximálního proudu jsou na Obr. 29.

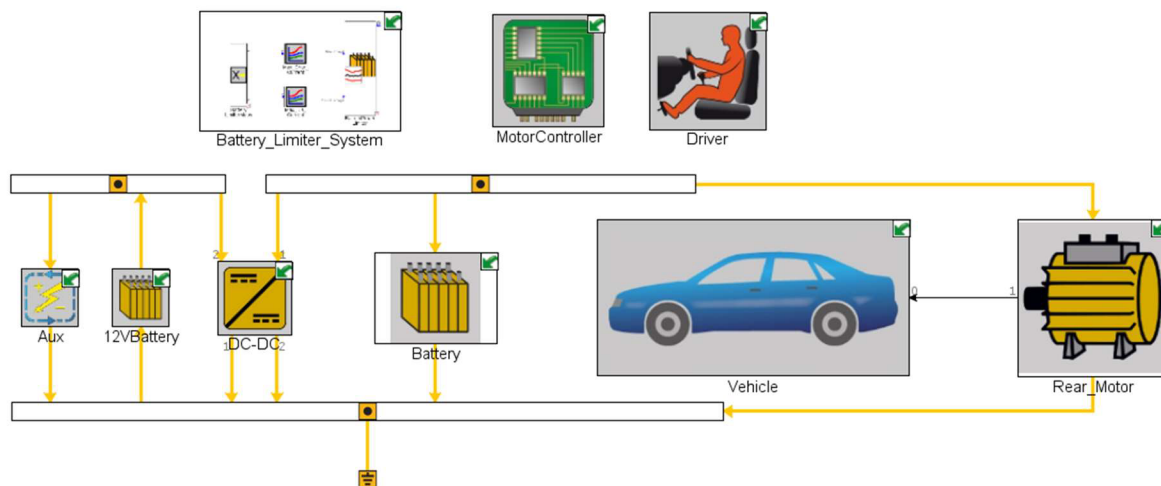


Obr. 29 Hodnoty maximálního povoleného proudu při nabíjení a vybíjení včetně polynomické regrese



## 6 MODEL ELEKTRICKÉHO VOZIDLA V GT-SUITE

Pro tvorbu modelu podélné dynamiky plně elektrického vozidla byl využit software GT-SUITE. Model vozidla se skládá z elektrického pohonného systému s pohonem zadních kol, vysokonapěťové trakční baterie, nízkonapěťové 12 V baterie, zjednodušeným modelem karoserie vozidla a následně řídicích prvků elektromotoru a vysokonapěťové baterie. K modelu byl vytvořen i jednoduchý chladicí okruh pro regulaci teploty vysokonapěťové baterie. Model vychází ze šablony plně elektrického bateriového vozidla s jedním elektromotorem dostupné z knihovny softwaru GT-SUITE ve verzi 2023. Vstupními parametry nastavení jednotlivých komponentů byly výstupy získané ze zpracovaných naměřených dat experimentálního vozidla v Kapitole 5 v kombinaci s údaji o vozidle v technické dokumentaci od výrobce vozidla a dalšími externími měřeními na experimentálním vozidle. Na Obr. 30 je ukázka modelu vozidla.

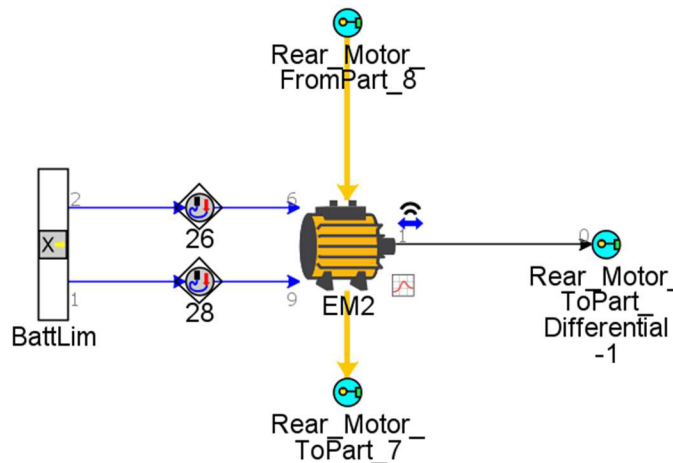


Obr. 30 Model podélné dynamiky elektrického bateriového vozidla v softwaru GT-SUITE

### 6.1 MODEL ELEKTROMOTORU

Pro modelování elektromotoru byl využit model z knihovny GT-SUITE „MotorGeneratorMap“. Maximální hodnoty točivého momentu v závislosti na otáčkách motoru pro motorovou a generátorickou oblast byly nastaveny pomocí vnější otáčkové charakteristiky motoru získané v kapitole 5.3. Pro účinnostní charakteristiku byla vložena účinnostní mapa z kapitoly 5.3, která vyjadřuje účinnost elektromotoru společně s výkonovou elektronikou, tedy střídačem umístěným u elektromotoru. Řízení motoru je určováno na základě signálu požadovaného točivého momentu z ovládacího prvku „Motor Controller“. Logika určování požadovaného momentu je vysvětlena v 6.5. Termální model motoru nebyl v tomto případě uvažován a teplotní závislosti motoru byly pro simulaci ignorovány. Zanedbání uvažování ztrátového tepla vlivem účinnosti elektromotoru nemá vliv na výsledky simulace, protože definované charakteristiky motoru nejsou teplotně závislé. Termální model by bylo vhodné nastavit v případě, že by byl vytvořen společný chladicí systém pro trakční baterii, výkonovou elektroniku a elektromotor.

Rotor elektromotoru je napojen přes hřídel (prvek „Shaft“) na diferenciál zadní nápravy a hodnota momentu setrvačnosti byla ponechána z výchozí šablony na  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Získání přesné hodnoty momentu setrvačnosti by vyžadovalo demontáž elektrického motoru, což není možné. Do motoru jsou také přiváděny signály z ochranného prvku baterie „Battery Limiter“, které stanovují maximální elektrický výkon při nabíjení a vybíjení.



Obr. 31 Model elektromotoru v softwaru GT-SUITE

## 6.2 MODEL BATERIE

Model baterie je koncipován jako jeden celek „Battery Pack“. Charakteristiky získané v kapitole 5.4 vyjadřující závislost napětí OCV a vnitřního odporu baterie  $R_0$  na stavu nabití a teplotním rozsahu od 20 do 30 °C byly nahrány do modelu baterie. Celý model baterie je na Obr. 32. Výpočtový model SoC byl nastaven na „Conventional“ a výpočet SoC je následující:

$$Cap(t) = Cap_{init} - \int_0^t I_{OCV} dt, \quad (6.1)$$

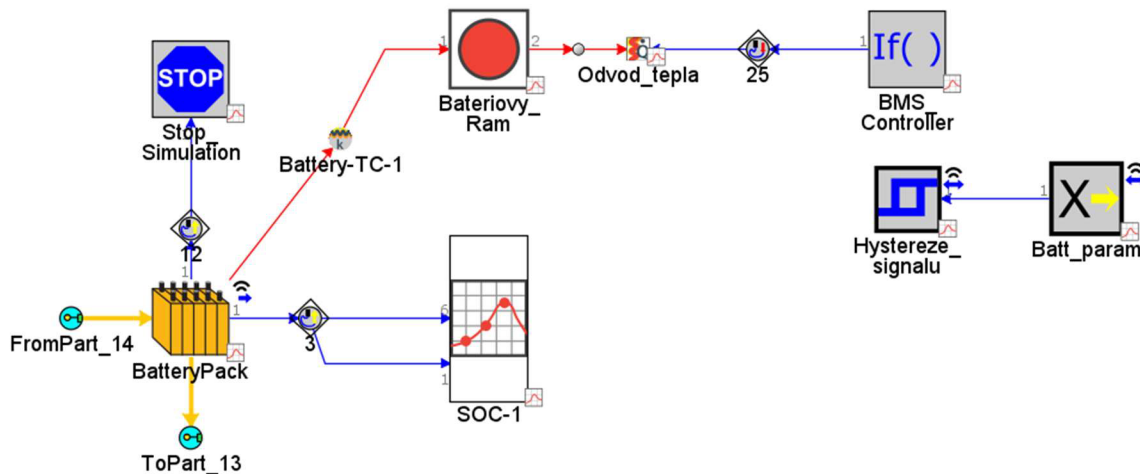
$$Cap_{init} = SoC_{init} \cdot Cap_{max} \quad (6.2)$$

$$SOC = \frac{Cap(t)}{Cap_{max}} \quad (6.3)$$

kde:

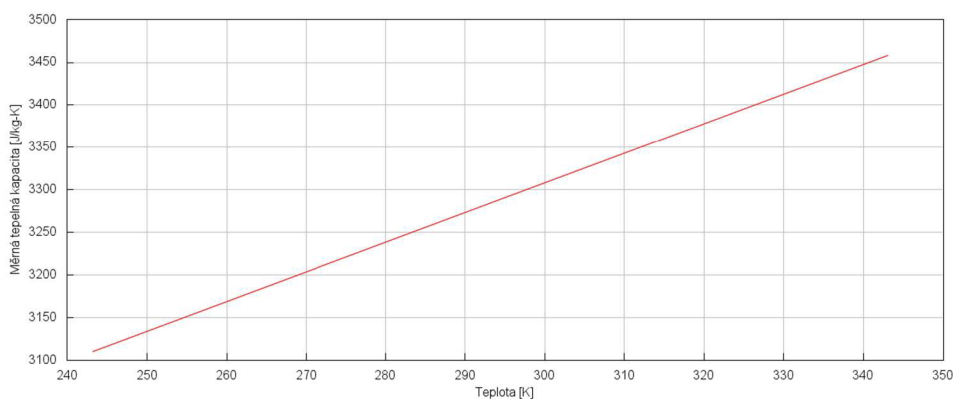
Cap(t)	[F]	aktuální kapacita baterie v průběhu simulace,
Cap <sub>init</sub>	[F]	hodnota kapacity na začátku simulace,
SoC <sub>init</sub>	[-]	hodnota SoC na začátku simulace,
Cap <sub>max</sub>	[F]	maximální kapacity baterie,
SoC	[-]	aktuální hodnota SoC v průběhu simulace.

Počáteční hodnota  $SoC_{init}$  je nastavena jako parametr a je ji možné individuálně měnit pro různé simulace. Celková kapacita baterie  $Cap_{max}$  byl vypočtena na základě dostupné hodnoty kapacity baterie od výrobce v kWh a nominálního napětí baterie.



Obr. 32 Model baterie s chladicím okruhem v softwaru GT-SUITE

U baterie bylo uvažováno ztrátové teplo vzniklé vnitřním odporem baterie, a proto byl přidán zjednodušený chladicí model. V experimentálním voze je chlazení baterie provedeno pomocí chladicí kapaliny, která proudí ve spodní části nosného rámu baterie, kde jsou uloženy jednotlivé bateriové moduly. K přenosu tepla dochází mezi jednotlivými články na stěnu modulu, z kterého je teplo následně odváděno do kapaliny. Kapalina je následně přivedena do výměníku tepla, kde dochází k jejímu ochlazení. Část tepelné energie se přenesou i do samotného rámu vozidla. Vytvořený chladicí systém uvažuje přenos tepla pouze mezi chladicí kapalinou a nosným rámem baterie.



Obr. 33 Měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě pro chladicí kapalinu

Jako chladicí kapalinu byla zvolena směs vody a glykolu. Parametry kapaliny byly určeny podle [38], přičemž tepelná vodivost je  $0,395 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , hustota  $1095 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a průběh měrné tepelné kapacity je zobrazen na Obr. 33. Hmotnost kapaliny byla zvolena na 14 kg a teplosměnná plocha mezi kapalinou a rámem byla odhadnuta na základě počtu bateriových článků a jejich rozměrů na  $1,3 \text{ m}^2$ . Rám baterie, modelovaný přes prvek „ThermalNode“, je nastavený jako



hliníkový plát o hmotnosti 72 kg do kterého je kondukcí odváděno teplo z chladicí kapaliny. Teplo z bateriového rámu je následně uměle odváděno do okolního vzduchu pomocí chladicího výkonu, jehož hodnota se mění podle nastavené logiky v BMS Controlleru.

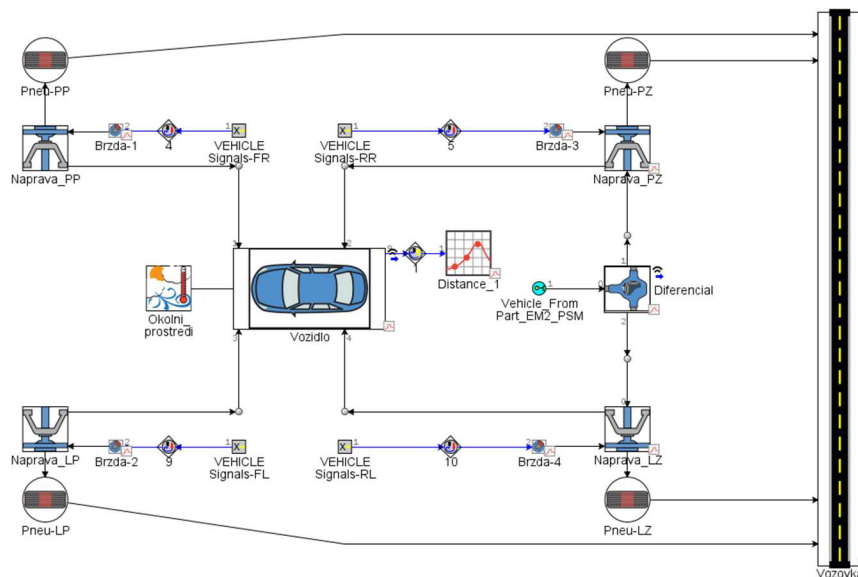
BMS Controller určuje chladicí, respektive ohřivací výkon podle rozsahu teplot. Z poskytnutých dat byl vybrán signál, na jehož základě je odstupňované chlazení a ohřívání baterie v experimentální vozidle. Podle zmíněného signálu a průběhu teploty baterie byl vytvořen velmi zjednodušený systém, který se snaží udržet teplotu baterie v rozmezí 27 až 31 °C. Pokud se teplota baterie nachází mimo tento interval, dojde k navýšení, případně snížení chladicího výkonu. Pro zahrnutí ohřevu baterie je nastaven pokyn pro obrácení tepelného toku z hliníkového plátu zpět do chladicí kapaliny baterie v případě, že je teplota baterie nižší než 20 °C.

Hodnota chladicího výkonu je funkcí teploty baterie a signálu přiváděného z prvku „Hystereze\_signalu“, kde dochází ke skokové změně výstupní hodnoty v závislosti na přiváděném vstupním signálu teploty baterie, přičemž hraniční hodnota změny signálu je závislá na gradientu teploty. Při klesání teploty je hraniční hodnota nastavena na nižší hodnotu než při nárůstu teploty.

K baterii je ještě přidán prvek „StopSimulation“, který ukončí simulaci při poklesu SoC pod 4 % a bude nahlášen stav vybití baterie.

### 6.3 VOZIDLO A JEHO PARAMETRY

Podsestava vozidla je složena z karoserie vozidla, přední a zadní nápravy včetně kol a brzd, diferenciálu na zadní nápravě a dále je zde i model vozovky a parametry vnějšího prostředí. Všechny komponenty jsou zobrazeny na Obr. 34.



Obr. 34 Schéma sestavy vozidla

Při nastavování parametrů vozidla byly použity hodnoty stanovené při měření polohy těžiště experimentálního vozidla, tedy celková hmotnost vozidla, poloha těžiště vozidla, rozvor kol. Pro nastavení aerodynamických vlastností byl použit koeficient aerodynamického odporu  $C_d$  o hodnotě 0,26, který je uvedený v technické dokumentaci vozu od výrobce. Čelní plocha vozidla  $2,38 \text{ m}^2$  byla určena na základě aproximace plochy vnějšího obrysu vozidla v softwaru Autodesk Inventor a známých rozměrů pro rozchod kol a výšky vozidla (viz Obr. 35).



Obr. 35 Určení čelní plochy experimentálního vozidla v softwaru Inventor

U diferenciálu bylo nutné stanovit hodnotu koncového převodu ze vstupní hřídele od motoru na výstupní hnací hřídele kol. Převodový poměr byl určen na základě porovnání hodnot signálu otáček elektromotoru a otáček hnaného zadního levého kola při jízdě na dálnici po časový interval 250 s. Rychlost vozidla i otáčky motoru byly udržovány na téměř konstantní hodnotě. Hodnoty účinnosti koncového převodu i momentů setrvačnosti výstupních hřídelí byly ponechány z šablony z knihovny GT-SUITE.

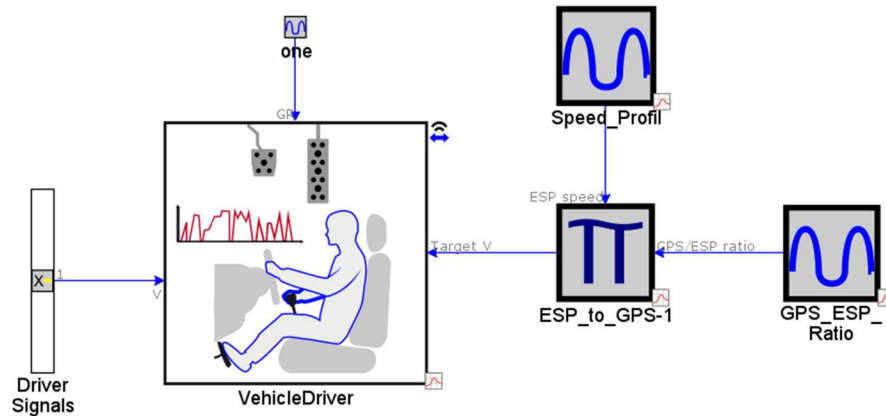
Všechny čtyři pneumatiky jsou shodné a mají ISO označení 235/55 R19 T. Parametr pro korekci závislosti valivého poloměru na rychlosti byl ponechán na hodnotě 0,98. Součinitel valivého odporu pneumatiky byl stanoven podle [27] (Tab. 1) na hodnotu 0.0125. Parametry okolního prostředí byly ponechány na automatické korekci dle nadmořské výšky, která je specifikovaná v komponentě Vozovka.

Do nastavení Vozovky byly nahrány zaznamenané hodnoty nadmořské výšky, zeměpisné šířky a délky v závislosti na čase. Na neupravená data z GPS byl uplatněn binomický vyhlazovací filtr pro vyhlazení vstupního signálu stoupání vozovky dostupný v softwaru GT-SUITE.

## 6.4 ŘIDIČ

Hlavním vstupem v nastavení řidiče je stanovení rychlostního profilu „ProfilTransient“, na jehož základě vznikají požadavky na řízení elektromotoru. Zadané rychlostní profily musejí být vyhlazené, aby neobsahovaly vysoké gradienty rychlosti, které by způsobovaly vysoké požadavky na moment motoru. Jelikož u rychlosti z GPS není garance, že u signálu nedojde k přerušení, byla zvolena rychlost z jednotky ESP (Elektronický stabilizační program), jejíž hodnota je nižší než rychlost z GPS. Následně byl určen poměr rychlostí z GPS a ESP, kterým

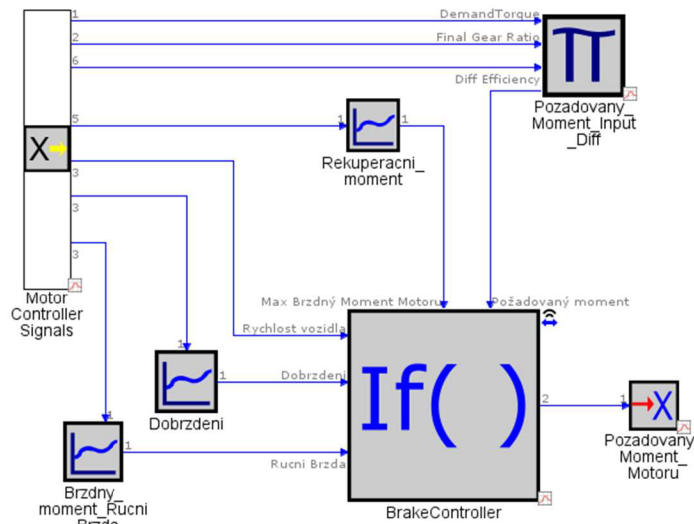
byla rychlost z ESP vynásobena, aby rychlostní profil odpovídal reálné rychlosti vozidla. Řidič je nastaven, aby dodržoval stanovenou rychlost vozidla. Dále je nastavena maximální povolená rychlost vozidla na  $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Ukázka schématu řidiče je na Obr. 36.



Obr. 36 Schéma sestavy řidiče

## 6.5 ŘÍZENÍ MOTORU

System pro řízení motoru („MotorController“) určuje výstupní moment elektromotoru a moment brzd. Dále stanovuje podmínky pro rekuperaci energie. Pracuje se vstupními signály požadovaného točivého momentu na vstupu do diferenciálu, převodovým poměrem koncového převodu v diferenciálu, rychlostí vozidla a maximálním brzdným (rekuperačním) momentem motoru. Schéma je uvedené na Obr. 37.

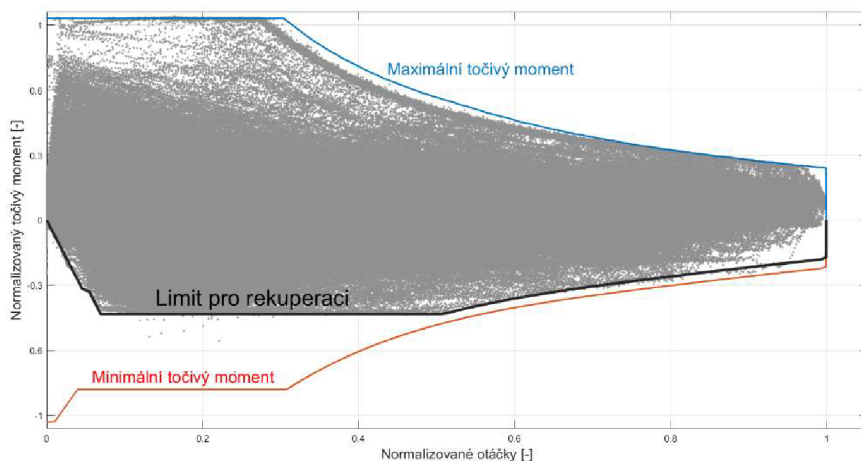


Obr. 37 Schéma sestavy BrakeControlleru

Nejprve je požadovaný moment na kolech vozidla od řidiče (na základě jízdního profilu) přepočítán na požadovaný moment na vstupu do diferenciálu. Na základě naměřených dat byl určen maximální brzdný (rekuperační) moment motoru (=minimální záporná povolená hodnota momentu motoru) v závislosti na otáčkách (viz Obr. 38). Logika řízení je následující.

V případě, že je rychlost vozidla v intervalu  $0,1$  až  $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a požadovaný moment je menší než  $0,1 \text{ N}\cdot\text{m}$ , tak je rekuperace vypnuta a je aktivované „Dobrzdění“, které pomáhá Řidičovi s dosáhnutím nulové rychlosti. V případě, že rychlost klesne pod  $0,1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , tak je aktivovaná „Ruční brzda“, která zamezí pohybu vozidla při stání na nakloněné vozovce.

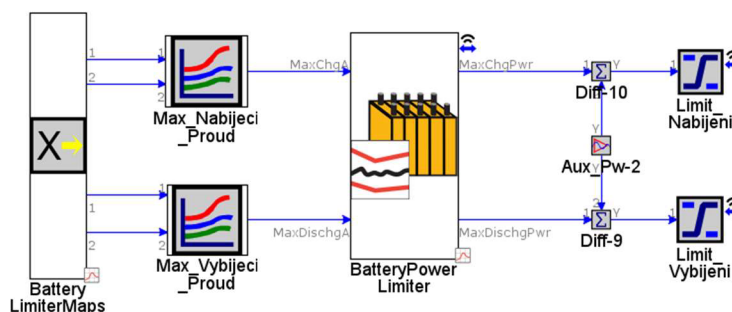
V případě, že je požadovaný moment záporný (vyžaduje se zpomalení) a rekuperační moment nepokryje tento požadavek, tak motor má nastavenou maximální rekuperaci a dopočet do požadovaného momentu od řidiče pokryje třecí moment na brzdách. Ve zbylých případech je třecí moment nulový a výstupní moment pro řízení motoru je roven požadovanému momentu od řidiče.;



Obr. 38 Stanovený limit pro rekuperaci

## 6.6 OCHRANA BATERIE

V sestavě pro ochranu baterie je omezovací prvek „BatteryPowerLimiter“, který na základě limitních hodnot pro napětí a proud určuje limitní hodnoty výkonu baterie při nabíjení a vybíjení. Z kapitoly 5.4 jsme byly vloženy pomocí vyhledávacích tabulek limitní hodnoty proudu při vybíjení a nabíjení, do kterých je přiveden signál teploty a SoC z baterie. Hodnoty minimálního napětí při vybíjení a maximálního napětí při nabíjení byly stanoveny jako konstantní hodnoty. Schéma modelu ochrany baterie je na Obr. 39.



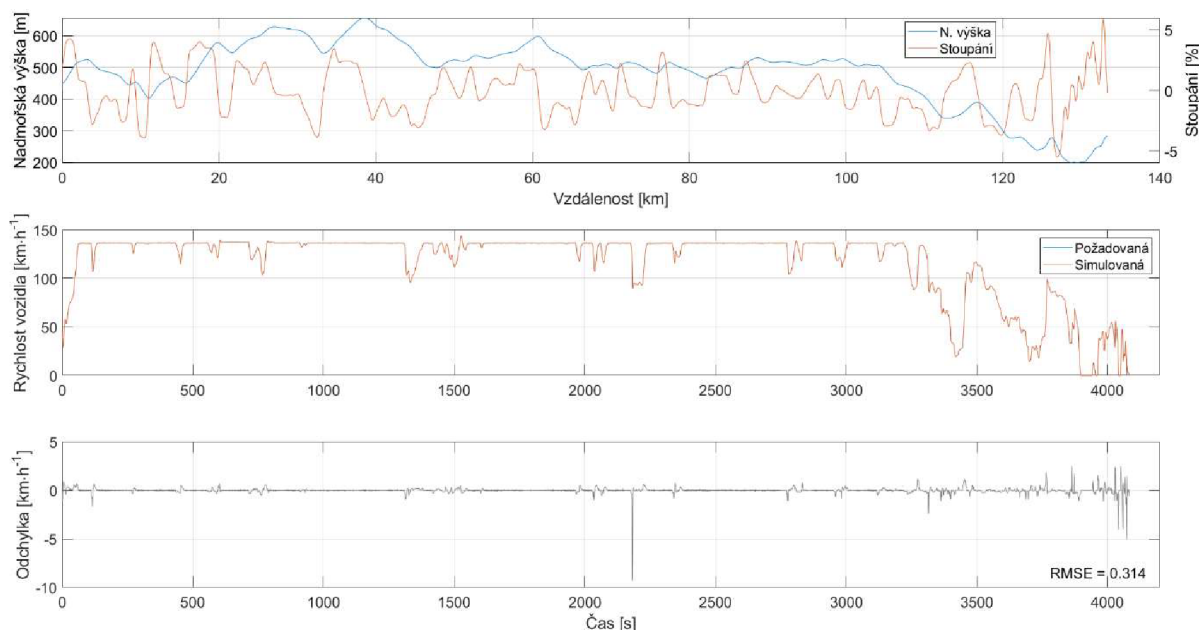
Obr. 39 Schéma systému ochrany baterie

## 7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Pro simulaci podélné dynamiky bateriového elektrického vozidla byly vybrány celkem 3 trasy. Jednotlivé trasy byly vybírány na základě odlišných rychlostních profilů tak, aby byly simulovány podmínky pro jízdu v nižších rychlostech ve městě s častějšími rozjezdy. Dále mimo město pro rychlosti do  $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a v neposlední řadě i jízdu na dálnici při rychlostech kolem  $130 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Výsledky jednotlivých simulací jsou v následujících podkapitolách. Vstupními parametry pro jednotlivé simulace byl stav nabití a teplota baterie, počáteční rychlost vozidla a rychlostní profil společně se stoupáním vozovky, které bylo vypočteno přímo v GT-SUITE na základě nahraných souřadnic z GPS.

### 7.1 TRASA Č.1

První trasa je na úseku Brno – Lohotky, kdy majoritní část jízdy na dálnici D1 a rychlost vozidla je udržována po většinu času na hodnotě  $136 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Počáteční hodnoty pro trasu č.1 je  $\text{SoC}_{\text{init}} 67,5 \%$ , teplota baterie  $32 \text{ }^\circ\text{C}$  a počáteční rychlost  $46 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Na spodních dvou grafech na Obr. 40 lze vidět rychlostní profil z naměřené jízdy společně se simulovanou rychlostí vozidla z GT-SUITE. Horní graf zobrazuje nadmořskou výšku společně se stoupáním v závislosti na ujeté vzdálenosti.

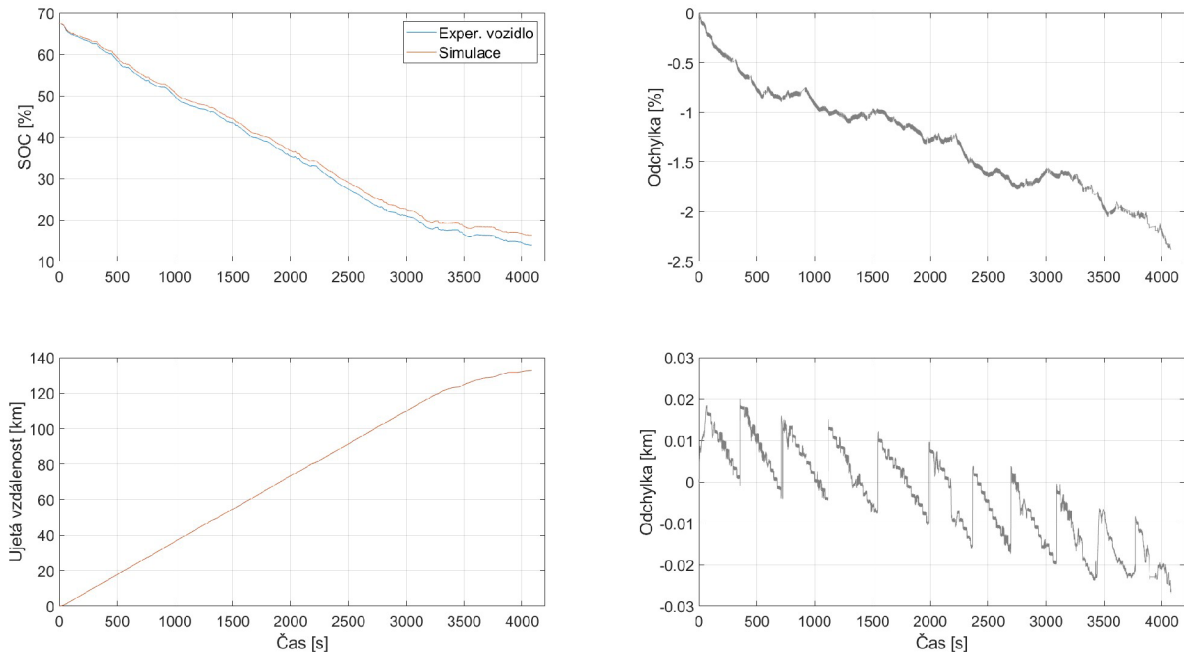


Obr. 40 Průběh nadmořské výšky a rychlosti vozidla pro trasu č. 1

Výstupní rychlost simulace dosahovala vysoké přesnosti, kdy střední kvadratická odchylka je rovna 0,314. Takto dobrý výsledek je dán z větší části charakterem jízdy, kdy po většinu času byla udržována konstantní rychlost. Vidíme, že nárůst odchylky je na konci simulace, kdy je rychlostní profil dynamičtější.

Na Obr. 41 je zobrazeno porovnání mezi simulovanou a měřenou hodnotou SoC a ujeté vzdálenost vozidla. Konečné hodnoty SoC se liší o necelých 2,5 %, přičemž očekávaná hodnota

měla být 13,95 % a SoC ze simulace skončilo na 16,3 %. Jednotlivé důvody, proč se křivky odlišují jsou detailněji popsány závěrečné shrnující kapitole 7.4. Výsledný rozdíl v ujeté vzdálenosti je 27 m.

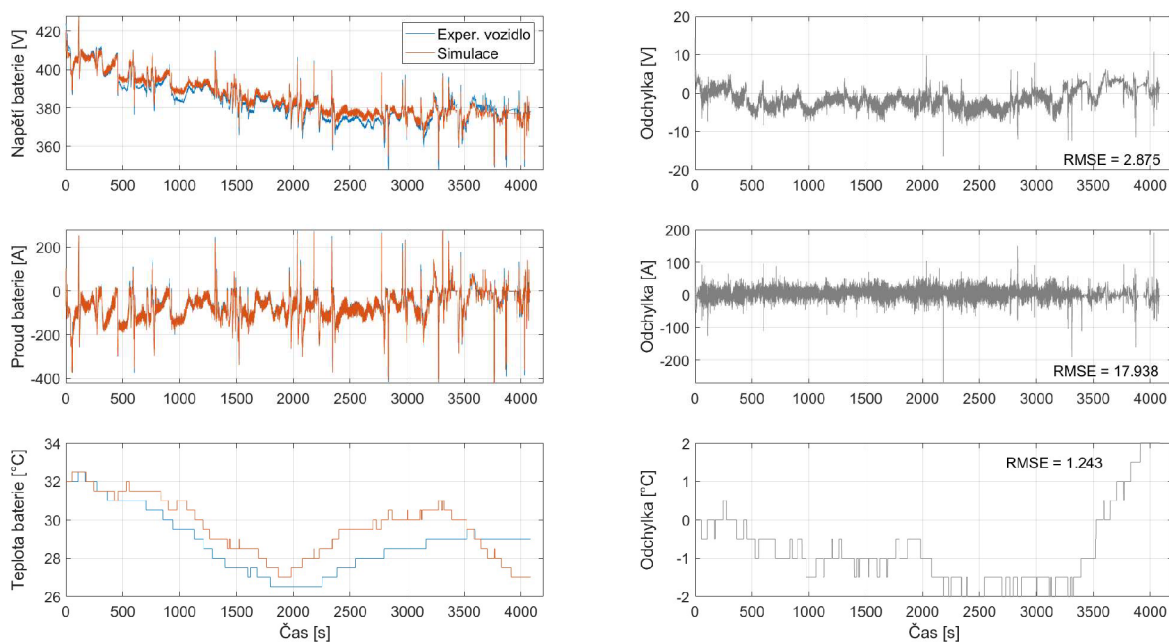


Obr. 41 Porovnání průběhu SoC a ujeté vzdálenosti mezi měřením a simulací v GT-SUITE (trasa č. 1)

Následují průběhy proudu, napětí a teploty baterie (Obr. 42). Zde se již jednotlivé průběhy poměrně odlišují. Respektive průběh napětí simulace je téměř po celou dobu záznamu odsazený o 2 až 3 V výše než napětí naměřené. Zde hraje roli přesnost určování parametrů baterie ( $R_0$  a OCV) v kapitole 5.4. Dalším důvod je, že výstupní veličiny ze simulace nejsou určovány s pravidelným krokem a jejich průměrná vzorkovací frekvence je okolo 2 Hz. Signály napětí i proudu jsou ve vozidle snímány s frekvencí 100 Hz a sjednocení dat na stejnou frekvenci je zatíženo určitou chybou. V neposlední řadě vytvořený model elektrického vozidla je koncipován pro modelování podélné dynamiky vozidla a nejsou v něm modelovány žádné další prvky, jako je systém pro vytápění a chlazení kabiny HVAC (Heating, ventilation and air conditioning) či samotný chladicí systém baterie, elektromotoru a vysokonapěťové elektroniky. Tyto prvky jsou napojeny na vysokonapěťovou síť a způsobují další odběr elektrické energie z baterie.

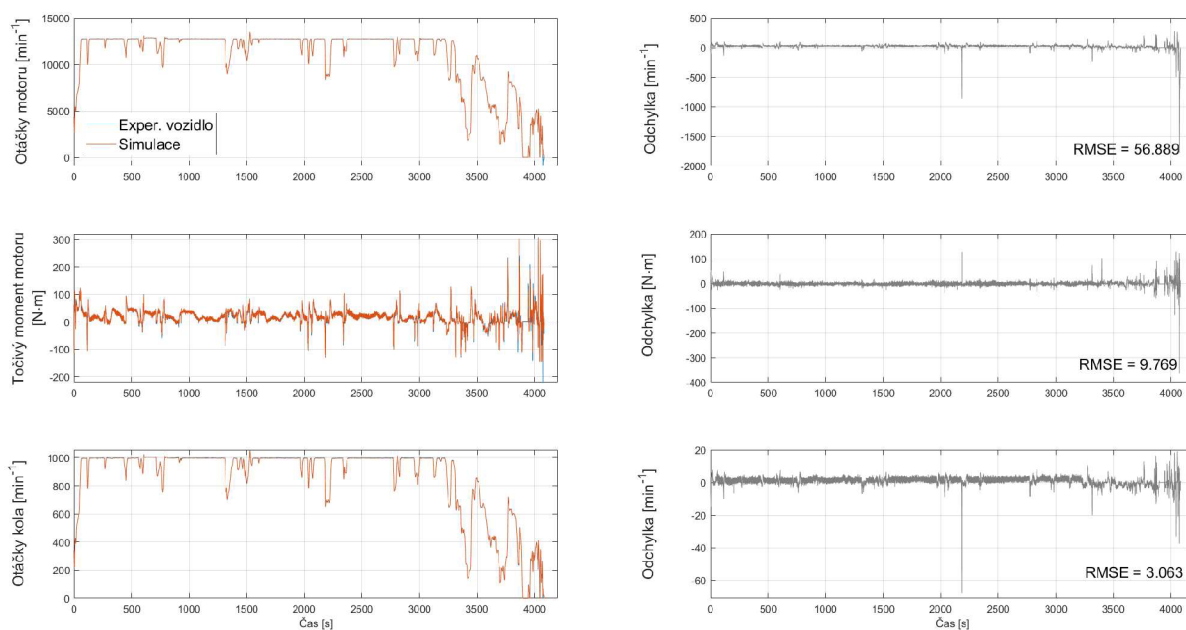
Podsystém baterie sice obsahuje v modelu chladicí systém, ale jeho potřebný výkon pro chlazení není propojený s elektrickou sítí vozidla. V spodním grafu je průběh teploty baterie, kdy se podařilo přiblížit průběhu regulace teploty baterie ve vozidle s poměrně dobrou přesností. Odchylka se pohybuje v rozmezí  $\pm 2$  °C.





Obr. 42 Porovnání průběhů proudu, napětí a teploty baterie mezi měřenými daty a simulací

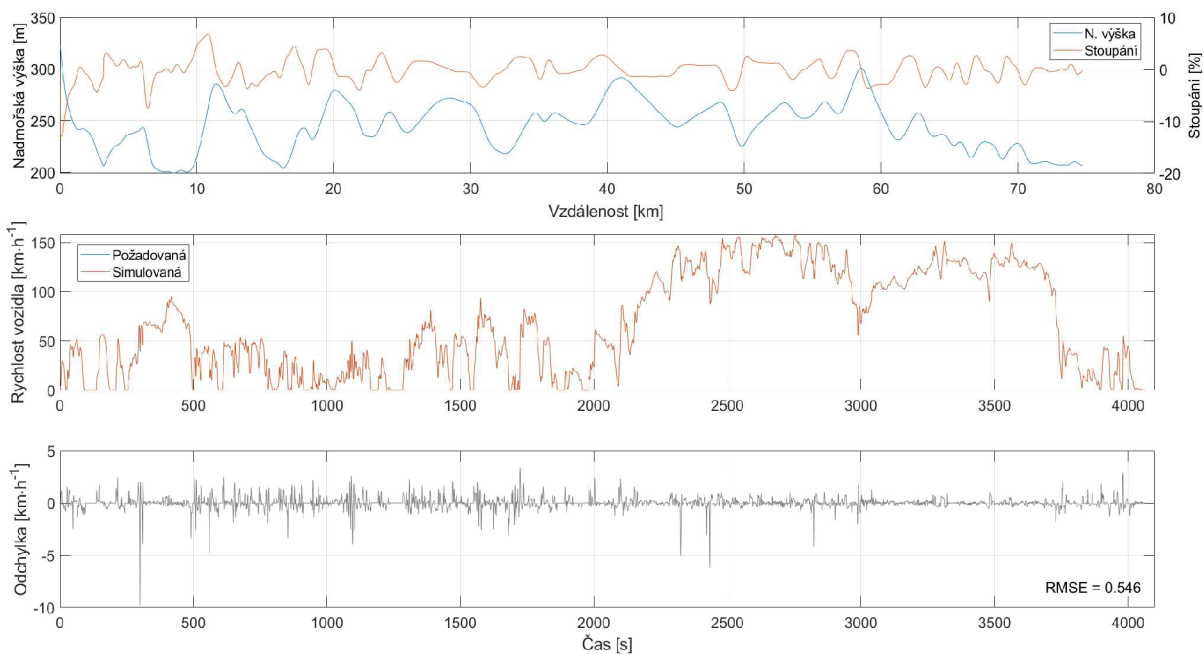
Jako poslední následují průběhy otáček a točivého momentu elektromotoru (Obr. 43). K nim je ještě přidáno porovnání otáček levého hnacího kola na zadní nápravě na jejichž základě byl určován převodový poměr koncového převodu. Průběhy otáček motoru v simulaci byl po většinu jízdy nižší o 20  $\text{min}^{-1}$  než při měření. U otáček kol se rozdíl pohyboval okolo 2  $\text{min}^{-1}$ . Vyšší odchylka na konci jízdy jsou způsobeny většími odchylkami v rychlosti, kdy dochází ke skokovému nárustu momentu pro potřebu zrychlení či zpomalení vozidla.



Obr. 43 Porovnání průběhů veličin motoru a otáček kol mezi naměřenými daty a simulací

## 7.2 TRASA Č.2

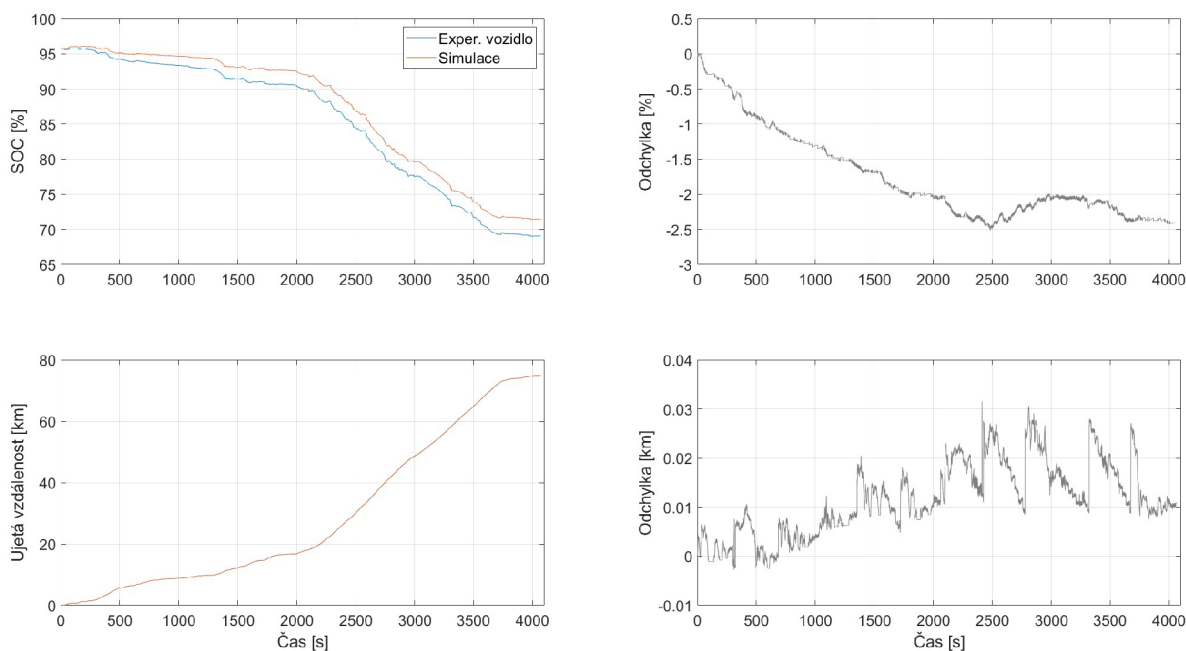
Druhá trasa představuje kombinaci jízdy ve městě, mimo město i na dálnici. Trasa směřovala z Brna, přes Vyškov, do Prostějova. První část trasy (do 2 200 s) je absolvována v městě Brno, následuje úsek na dálnici, na časové ose zhruba po 3 700 s, a jízda je zakončena příjezdem do centra Prostějova. Počáteční hodnota stavu nabití baterie  $SoC_{init}$  je 95,7 %, teplota baterie začíná na 10,5 °C a vozidlo startuje z klidu. Průběhy rychlosti a nadmořské výšky, včetně stoupání, jsou na Obr. 44. Trasa směřovala z města do Brna přes Vyškov do Prostějova. První část trasy je absolvována v centru Brna, následuje úsek na dálnici a simulace je zakončena příjezdem do centra Prostějova. Očekávaná hodnota SoC na konci simulace je okolo 69 % a ujetá vzdálenost by se měla pohybovat okolo 75 km.



Obr. 44 Porovnání průběhu veličin elektromotoru a otáček levého zadního kola mezi naměřenými daty a simulací pro trasu č. 2

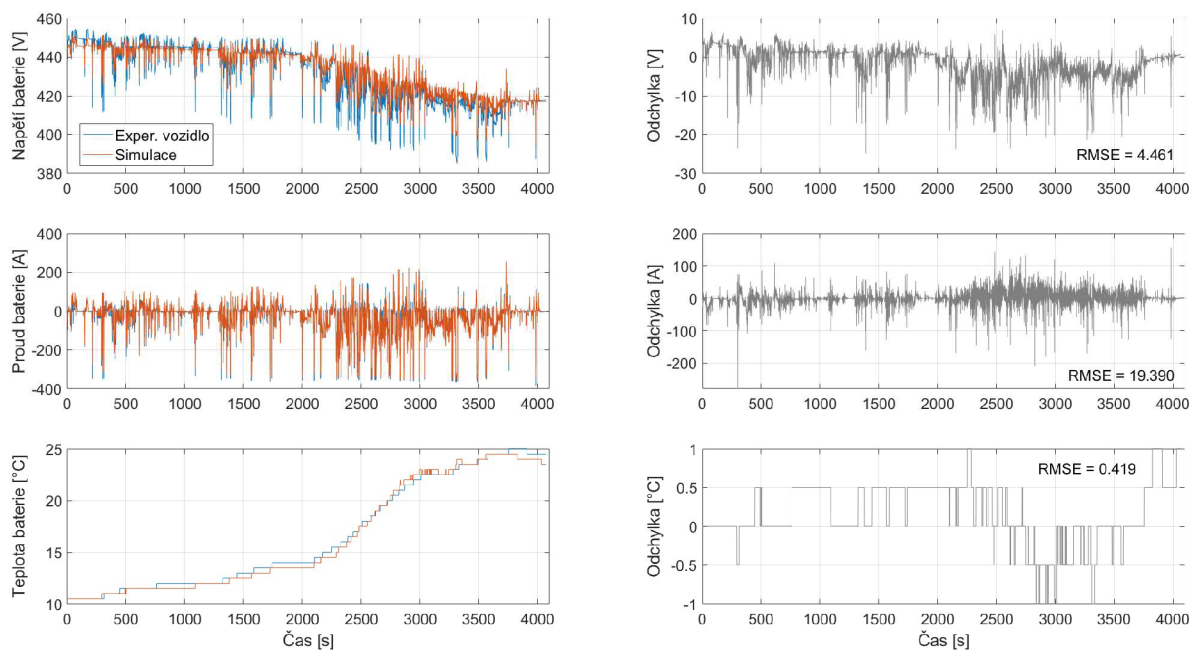
Porovnání průběhu SoC a ujeté vzdálenosti dopadl obdobně jako v případě první trasy (Obr. 45). Rozdíl stavu nabití na konci jízdy mezi simulací a naměřenými daty je 2,5 %. Celková ujetá vzdálenost je 74,9 km, přičemž rozdíl mezi simulací a naměřenými daty je 10 m. Navyšování velikosti odchylky SoC je během prvních 2 500 s téměř lineární. Důvodem je odebraný výkon ve vozidle pro ohřev baterie a kabiny, který model vozu nereflkuje.





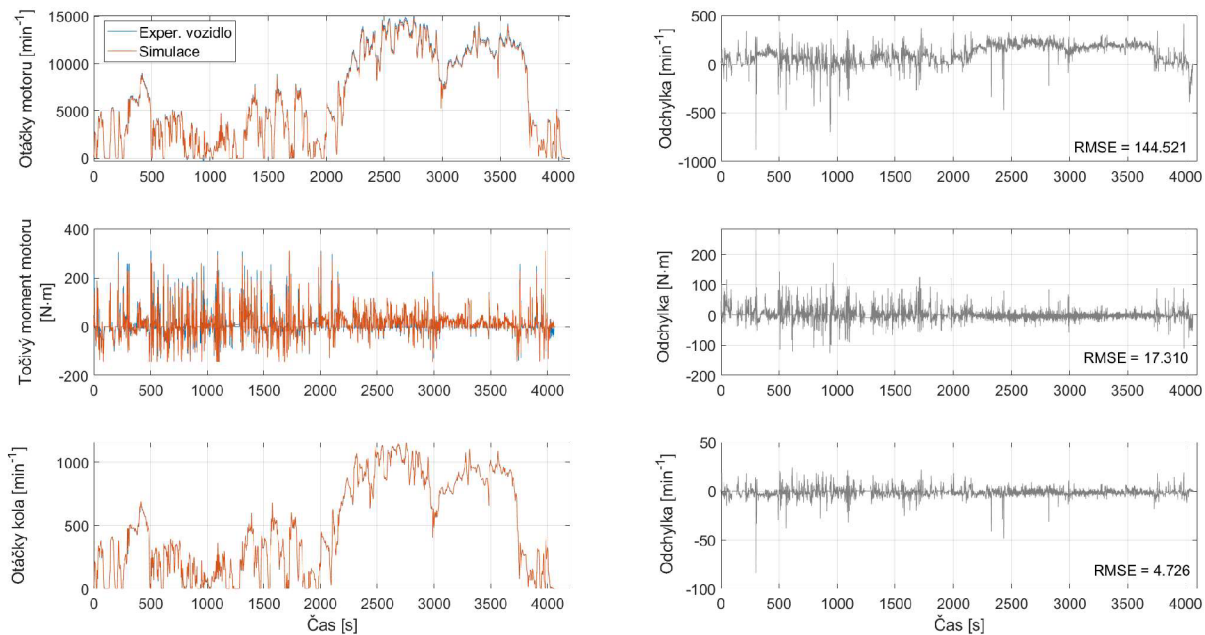
Obr. 45 Porovnání průběhu SoC a ujeté vzdálenosti s naměřenými daty

V případě veličin baterie jsou průběhy napětí a proudu mírným zlepšení oproti odchylkám v trase č.1. Poměrně velké odchylky v průběhu napětí je možné zdůvodnit tím, že model zde pracuje v nezmapované oblasti, kdy z vytvořených charakteristik v kapitole 5.4 byly použity pouze dvě pro rozsah teplot od 20 do 30 °C a zde je baterie provozována po 65 % času za teploty nižších než 20 °C. Z průběhu regulace teploty je vidět, že nastavení výkonu pro ohřev je odpovídající a odchylka teplot se pohybuje v rozmezí  $\pm 1$  °C (viz Obr. 46).



Obr. 46 Porovnání průběhu veličin baterie mezi simulací a naměřenými daty pro trasu č.2

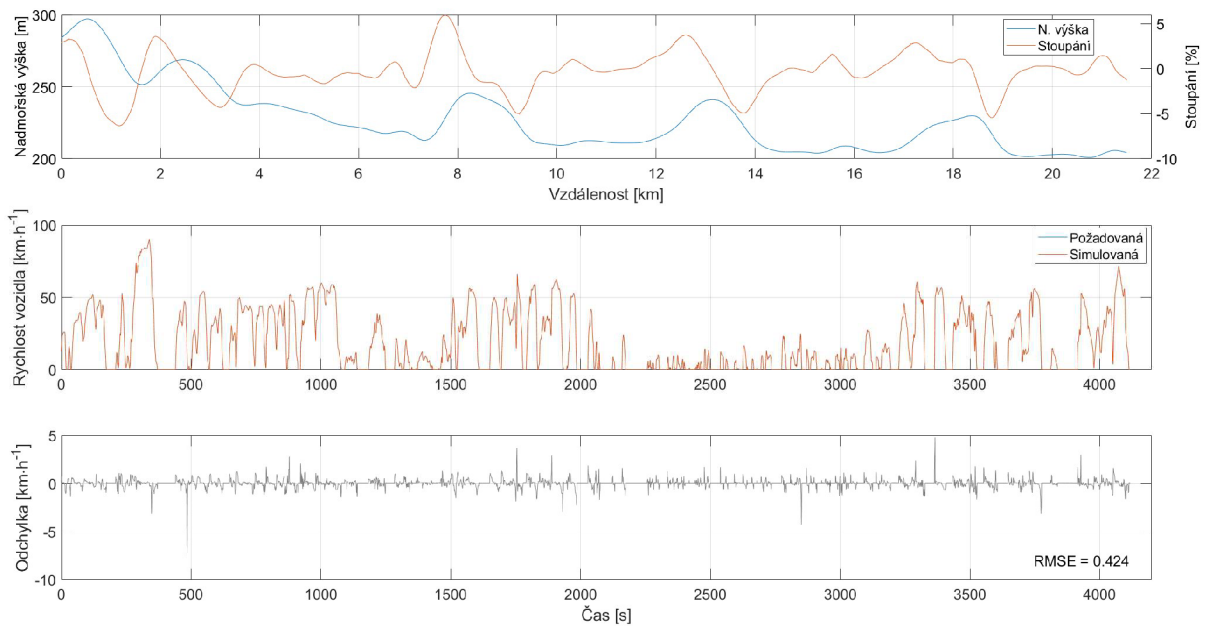
Porovnání průběhu veličin elektromotoru a otáček levého zadního kola jsou k vidění na Obr. 47. Oproti předešlému záznamu zde došlo ke zhoršení, kdy střední kvadratická odchylka je více jako dvounásobná oproti trase č.1. Prvním důvodem je mnohem dynamičtější jízdní profil. Dalším důvodem je nastavení rekuperace energie. Model motoru je nastavený tak, aby využíval nastavenou křivku maximálního rekuperačního momentu pro zpomalení vozidla. V případě, že je nárok na zpomalení vozidla větší, než je schopný ubrzdít motor, jsou zapojeny brzdy. V modelu nejsou reflektovány situace, kdy dojde k přímému brzdění pomocí brzd bez zapojení elektromotoru, a proto dochází k vysokým odchylkám v průběhu otáček i momentu motoru.



Obr. 47 Porovnání průběhu veličin elektromotoru a otáček kol mezi naměřenými daty a simulací pro trasu č.2

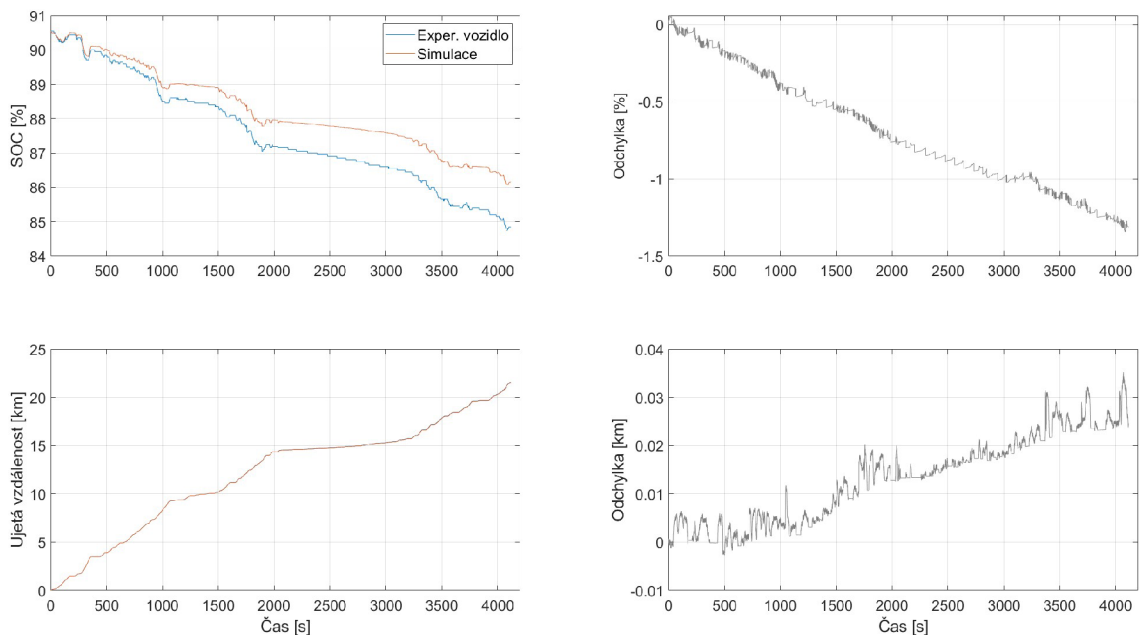
### 7.3 TRASA Č.3

Poslední trasa reprezentuje výhradně městský jízdní profil. Rychlost vozidla je po 98 % procentu času trasy pod  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Cesta byla uskutečněna v ulicích centra města Brna. Počáteční parametry jsou následující.  $\text{SoC}_{\text{init}}$  startuje na 90,5 %, teplota baterie na  $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$  a počáteční rychlost vozidla je  $12,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Na konci simulace jsou očekávané hodnoty SoC okolo 85 % a ujetá vzdálenost by se měla přibližovat hodnotě 21,5 km. Průběhy rychlosti vozidla jsou zobrazeny na Obr. 48.



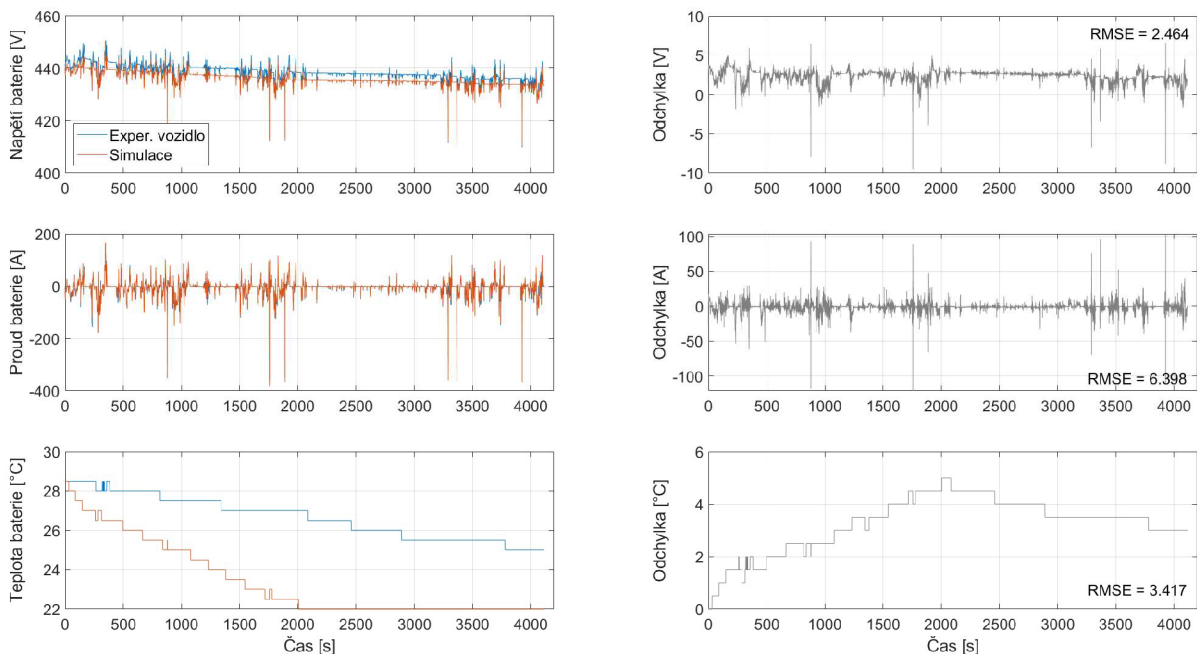
Obr. 48 Porovnání průběhu rychlosti simulace s naměřenými daty pro trasu č.3

Průběh odchyšky rychlosti pro městský jízdní profil s častým zastavováním vozidla byl původně násobně horší než u předešlých dvou tras. Důvodem bylo špatné propojení brzdění pomocí třecího momentu na brzdách a elektromotorem v oblastech s nízkou rychlostí. Brzdný moment elektromotoru je pro nízké otáčky prakticky nulový a špatným nastavením požadavku na aktivaci brzd docházelo k tomu, že vozidlo si udržovalo stálou rychlost v rozmezí 1 až 3  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , ačkoliv rychlostní profil vyžadoval nulovou rychlost. Tímto vlivem pak byla i celková ujetá vzdálenost na konci cyklu o 1,5 km více oproti reálným hodnotám. Přidáním dalšího nastavení pro brzdění při nízkých rychlostech se tento problém podařilo vyřešit pro tuto i ostatní trasy. Výsledná střední kvadratická odchyška rychlosti je 0,424.



Obr. 49 Porovnání průběhu SoC a ujeté vzdálenosti pro trasu č.3

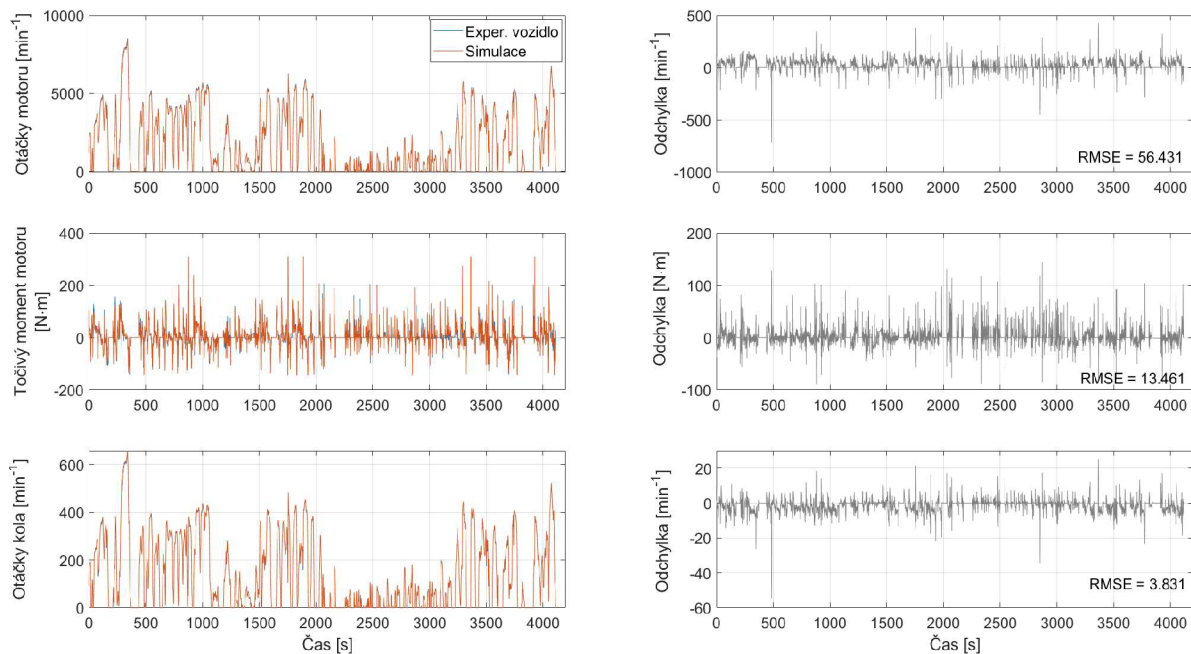
Rozdíl SoC je opět souvisí s mírou nastavení stupně a využití rekuperace pomocí motoru. Dalším důvodem je opět využití části energie pro ohřev vzduchu v kabině vozidla, protože okolní teplota během této jízdy se pohybovala okolo 10 °C. Výsledné hodnoty ujeté vzdálenosti jsou opět téměř identické, kdy rozdíl tvoří pouhých 24 m (viz Obr. 49).



Obr. 50 Porovnání průběhu veličin baterie mezi naměřenými daty a simulací pro trasu č.3

Průběh odchylky proudu je v porovnání s předešlými dvěma měřeními značně lepší a střední kvadratická odchylka je na hodnotě 6,398. Naopak průběh napětí je celý posunutý zhruba o 4 V níže oproti naměřenému napětí. Zde je opět chyba způsobena pravděpodobně odhadem hodnot OCV pro vyšší hodnoty OCV. Zároveň zde má vliv i velký rozdíl v teplot, kdy BMS ve vozidle snižovala teplotu baterie mnohem pozvolněji, než k tomu docházelo v simulaci. Jednotlivé průběhy jsou na Obr. 50.

Na Obr. 51 jsou vyobrazeny průběhy porovnávaných veličin elektromotoru a otáček kol. Jednotlivé odchylky pro signály točivého momentu, otáček motoru i otáček kol jsem velmi blízké hodnotám z prvního měření, ačkoliv rychlostní profily obou tras jsou diametrálně odlišné. Z rozdílových hodnot točivého momentu je patrné, že k větším odchylkám docházelo v generátorické oblasti. Důvodem je opět, že u modelu v GT-SUITE je upřednostňováno brzdění motorem před aktivací brzd.



Obr. 51 Porovnání průběhu veličin elektromotoru mezi naměřenými daty a simulací pro trasu č. 3

## 7.4 ZHODNOCENÍ

Pro určení přesnosti a funkčnosti vytvořeného modelu podélné dynamiky plně elektrického vozidla byly vybrány tři odlišné trasy. Každá trasa je charakteristická svým rychlostním profilem, vnějšími podmínkami, rozsahem stavu nabití baterie či profilem stoupání. Cílem bylo získat výstupní veličiny a na základě jejich porovnání s naměřenými daty stanovit, zda jsou vstupní data a úroveň modelu dostačující pro možné budoucí využití modelu jako součást digitálního dvojčete elektrického vozidla.

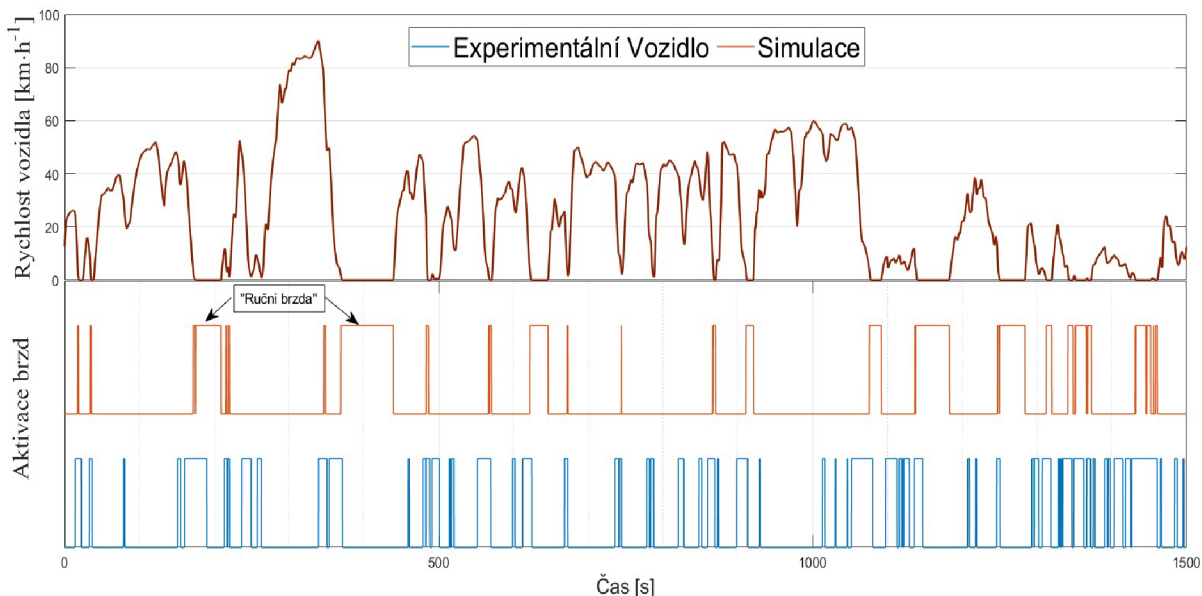
Velký vliv na výstupy modelu má kvalita zpracování vstupního rychlostního profilu. Při použití signálu rychlosti z GPS vykazoval model poměrně velké odchylky u průběhu točivého momentu a otáček motoru. I přes následné filtrování a vyhlazování signálu se nedostavovala vyšší přesnost. Kvalita signálu GPS není během zaznamenávání hodnot konstantní a dochází ke zkreslování rychlosti vozidla. Navíc během jízd v běžném provozu dochází i k plnému odstínění přijímaného signálu a zaznamenanou rychlost pak není možné použít jako vstupní parametr. Nejvhodnější náhradou se ukázalo využití rychlosti vozu ze signálu ESP, který hodnotou neodpovídá reálné rychlosti vozidla, ale je snímán s frekvencí 50 Hz, a poskytuje velmi detailní představu o průběhu rychlosti. Výsledná metoda pro určení vstupního rychlostního profilu je kombinace obou signálů rychlosti, kdy je určen vzájemný poměr mezi rychlostmi signálu rychlosti GPS a rychlosti z ESP, a tímto koeficientem je pak násoben rychlostní profil z ESP.

Na rozdílnosti výsledných průběhů SoC se podílí více faktorů. Jako první je rozdílná rychlost vozidla mezi simulací a požadovanou (reálnou) rychlostí. Simulovaný řidič nedokáže dodržet rychlostní profil s nulovou odchylkou. Čím dynamičtější je profil dané trasy, tím větší vznikají odchylky rychlosti a simulovaný řidič se snaží rychlost vyrovnat pomocí prudkých akcelerací a zpomalení, které vytvářejí skokové nárůsty hodnot v požadovaném točivém momentu



elektromotoru. Přes požadavek elektromotoru na potřebný elektrický příkon z baterie se následně přenáší špičkové hodnoty do elektrického obvodu, které mohou způsobit nadměrné nabíjení/vybíjení baterie.

Dalším faktorem je rekuperace energie. Ve vozidle je řidiči umožněno nastavit si různé stupně rekuperace energie. Z poskytnutých záznamů dat byl dohledán signál z CAN jednotky jízdních asistentů o volbě stupně rekuperace. Nicméně se nepodařilo najít další informace, které by pomohly určit přesné nastavení rekuperačního momentu. Navíc ve většině zaznamenaných jízd byl používán automatický systém rekuperace, jehož nastavení si určuje řídicí jednotka. Proto byl zvolen přístup maximálního rekuperačního momentu, který byl stanoven ze zaznamenaných hodnot točivého momentu a otáček motoru. Logika při požadovaném zpomalování byla nastavena tak, že dochází k využití maximálního brzdného (rekuperačního) momentu motoru. V případě, že je požadavek na zpomalení vozidla větší, než je motor schopen zajistit, je k rekuperačnímu momentu přidán třecí moment brzdy. Ukázkou rozdílnosti aktivace brzd při reálné a simulované jízdě je na Obr. 52. Úsek s označením „Ruční brzda“ odkazují na opatření pro udržení vozidla v klidu v případě nenulového stoupání, uvedeného v kapitole 6.5. Z grafu



Obr. 52 Úsek jízdy z trasy č. 3 se signály aktivace brzd ze simulace a naměřených dat

je zřejmé, že četnost zapojení brzd v reálném vozidle je vyšší oproti simulaci, a i proto vychází simulované SoC vyšší.

Třetím faktorem jsou charakteristiky baterie. Jednou z myšlenek této práce bylo zjistit, jaké přesnosti lze dosáhnout pouze na základě zpracování naměřených signálů z vozidla. Proto byly veškeré parametry baterie určovány a odhadovány pouze na základě signálů z řídicích jednotek vozidla. Tento způsob však není schopný nahradit konvenční metody pro získání parametrů OCV a  $R_0$  pomocí přímého měření na bateriových člancích. Zvolená metoda navíc klade vysoké nároky na množství a rozsah naměřených dat, aby bylo možné stanovit kompletní charakteristiky baterie.

S přesností charakteristiky baterie souvisí i poslední faktor, kterým je požadovaná komplexnost modelu. Vozidlo se jako funkční celek skládá z mnoha samostatných systémů, které se

vzájemně ovlivňují. Pro vytvoření velmi přesného modelu podélné dynamiky vozidla by bylo nutné zahrnout do modelu prvky, které přímo či nepřímo ovlivňují pohonný systém vozidla. Jeden z nejvíce důležitých je chladicí systém zajišťující chlazení či ohřev baterie, elektromotoru a výkonové elektroniky. Bez odpovídající regulace teploty baterie a dalších prvků postrádá smysl stanovování přesných charakteristik v závislosti na SoC a teplotě. Dále sem patří například systémy obstarávající komfort posádky.

Další prostor pro zlepšení je přesné určení parametrů pro jízdní dynamiku vozidla. Zde byly využity pro modelování odporových sil buď údaje z technické dokumentace vozidla, jako je například koeficient aerodynamického odporu, nebo z odborné literatury (koeficient valivého odporu), nebo z měření těžiště vozidla. Určité zpřesnění vozidla by přineslo stanovení celkové odporové síly na základě naměřené dojezdové zkoušky.

## ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo určení, jaké přesnosti se dá dosáhnout při modelování podélné dynamiky vozidla na základě naměřených dat z experimentálního elektrického vozidla během jízd v běžném provozu. Během zpracovávání práce byl kladen důraz na obsáhnutí co největšího počtu potřebných parametrů čistě z naměřených signálů z CAN komunikace vozidla.

Jeden z hlavních vlivů na přesnost modelu má kvalita zpracování vstupního rychlostního profilu. Vhodnou variantou je použití průběhu rychlosti z GPS. Určité riziko zde však představuje kvalita zaznamenávání rychlosti v GPS. Možným řešením je využití signálu rychlosti z ESP. Po sjednocení signálů na stejnou snímanou frekvenci jsou rychlosti vyděleny a je získán poměr rychlostí v každém měřeném bodě. Pro simulaci je následně využit signál z ESP vynásobený poměrovým koeficientem, aby byla v simulaci požadovaná rychlost rovna skutečné rychlosti vozidla z GPS. Součástí tvorby jízdního profilu je i průběh stoupání vozovky. Pro model byl použit výpočet stoupání na základě souřadnic z GPS v závislosti na čase. V průběhu ladění parametrů vykazoval model lepší výsledky při použití binomického vyhlazovacího filtru oproti použití Savitsky-Golayova filtru. Určitě by bylo dobré porovnat další možné způsobení stanovení stoupání vozovky.

Dalším faktorem ovlivňující výsledky simulace je nastavení řidiče a jeho „důrazu“ na dodržování požadované rychlosti. Při zvolení vysoké hodnoty koeficientu agresivity bude docházet k vysokému zrychlení a zpomalení vozidla, které se projeví ve skokovém zvýšení či poklesu požadovaného momentu motoru, a to se následně projeví i průběhu proudu a napětí baterie vozidla. Nastavení je tedy nutné volit s ohledem na charakter jízdního profilu.

Během všech tří simulovaných jízd vždy vyšel konečný stav nabití baterie vyšší oproti reálné jízdě. Rozdíl je způsobený více vlivy. Prvním faktorem je způsob určení charakteristiky baterie. Jelikož bylo snahou většinu parametrů ze signálů, byl pro odhad parametrů baterie sestaven model baterie v Simulinku a na základě vstupních hodnot proudu a napětí na výstupu z baterie ve vozidle bylo odhadováno napětí na prázdko a vnitřní odpor baterie. Výsledky z této simulace nedopadly podle očekávání a určitě je zde velký prostor pro zlepšení ať už samotné použité metody či využití jiných modelů a výpočtů pro odhad parametrů baterie. Je nutné vzít v potaz, že těmito metodami není nikdy možné dosáhnout přesnosti jako při měření vlastností baterie na zkušebních stanicích. V případě použití modelu pro účel vytvoření digitálního dvojčete elektrického vozidla by bylo vhodné změřit parametry samotných bateriových článků baterie pro navýšení přesnosti modelu. Možnou alternativou je získání hodnot OCV během dobíjení vozidla ze stojanu, kdy by bylo potřeba zajistit, aby nabíjecí proud byl konstantní a nabíjení by muselo být přerušováno v pravidelných intervalech, aby se napětí baterie ustálilo a mohlo být změřeno. Tímto by se získaly hodnoty OCV pro nabíjení vozidla, které by mohly být využity jako počáteční hodnoty pro odhad OCV během vybíjení.

Dalším faktorem ovlivňující SoC je obecně neuvažování dalších systémů, které odebírají elektrickou energii z baterie. Hlavní je systém chlazení pohonného systému vozidla a pak také systém pro tepelný management kabiny vozidla, kde největší odběr způsobuje kompresor klimatizace. Zároveň pro budoucí potřeby digitálního dvojčete je nutnost vytvoření modelu chladičového systému vozidla, protože parametry baterie, výkonové elektroniky i elektromotoru jsou teplotně závislé.

Dalším faktorem, který ovlivňuje i další veličiny než jen SoC je stupeň rekuperace motorem a aktivace brzd. Ve vytvořeném modelu byl docházelo k maximální rekuperaci v celém rozsahu



simulace a aktivace brzd byla použita v případě, kdy byl vyžadován větší brzdný moment byl limitní moment motoru. Pro budoucí využití modely by vhodné sestavení stupňů rekuperace a případně naprogramovat algoritmus pro automatickou rekuperaci s ohledem na jízdní komfort a další faktory, jako je tomu ve vozidle.

V modelu byly pro jízdní dynamiku vozidla nastaveny parametry hmotnosti vozu a univerzální hmotnosti řidiče 75 kg, z hlediska aerodynamiky byla odhadnuta čelní plocha a koeficient aerodynamického odporu byl určen na základně informací od výrobce. Zpřesnění modelu by vylepšily data z dojezdové zkoušky a také informace ohledně aktuálního hmotnosti vozidla během jízdy.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MISKINIS, Carlos. *The history and creation of the digital twin concept* [online]. 2019 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>
- [2] URI, John. *50 Years Ago: "Houston, We've Had a Problem"* [online]. NASA Johnson Space Center, 2020 [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/history/50-years-ago-houston-weve-had-a-problem/>
- [3] GRIEVES, Michael. *Origins of the Digital Twin Concept* [online]. 2016 [cit. 2023-11-04]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.26367.61609
- [4] ABOELHASSAN, Ayman, Ahmed H. SAKR a Soumaya YACOUT. *General purpose digital twin framework using digital shadow and distributed system concepts* [online]. 2023, **183** [cit. 2023-11-05]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/j.cie.2023.109534
- [5] BOYES, Hugh a Tim WATSON. Digital twins: An analysis framework and open issues. *Computers in Industry* [online]. 2022, **143** [cit. 2023-11-10]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/j.compind.2022.103763
- [6] GLAESSGEN, Edward a David STARGEL. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference<BR>20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference<BR>14th AIAA [online]. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012, 2012-04-23, - [cit. 2023-11-10]. ISBN 978-1-60086-937-2. Dostupné z: doi:10.2514/6.2012-1818
- [7] SCOTT, Rab. *Untangling the requirements of a Digital Twin* [online]. The University of Sheffield: Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC), 2020, 32 [cit. 2023-11-10]. Dostupné z: [https://www.amrc.co.uk/files/document/406/1605271035\\_1604658922\\_AMRC\\_Digital\\_Twin\\_AW.pdf](https://www.amrc.co.uk/files/document/406/1605271035_1604658922_AMRC_Digital_Twin_AW.pdf)
- [8] ORSINGHER, Chiara, Lars WITELL a Mohamed ZAKI. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms. *Journal of Service Management* [online]. 2018, 2018-09-07, **29(5)**, 776-808 [cit. 2023-11-04]. ISSN 1757-5818. Dostupné z: doi:10.1108/JOSM-04-2018-0113

- [9] ATTARAN, Mohsen a Bilge Gokhan CELIK. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal* [online]. 2023, **6** [cit. 2023-11-04]. ISSN 27726622. Dostupné z: doi:10.1016/j.dajour.2023.100165
- [10] *DIFFERENCE BETWEEN DIGITAL TWIN, DIGITAL MODEL, AND DIGITAL SHADOW* [online]. WIZATA. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.wizata.com/knowledge-base/difference-between-digital-twin-digital-model-and-digital-shadow>
- [11] CHOUDHARY, Dr. Sarika a Gaurav MEENA. Internet of Things: Protocols, Applications and Security Issues. *Procedia Computer Science* [online]. 2022, **215**, 274-288 [cit. 2023-11-11]. ISSN 18770509. Dostupné z: doi:10.1016/j.procs.2022.12.030
- [12] KNEBEL, Francisco Paiva, Rafael TREVISAN, Givanildo Santana do NASCIMENTO, Mara ABEL a Juliano Araujo WICKBOLDT. *A study on cloud and edge computing for the implementation of digital twins in the Oil & Gas industries* [online]. 2023, **182** [cit. 2023-11-11]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIE.2023.109363
- [13] GLOVER, Ellen. Strong AI vs. Weak AI: What's the Difference? *Built In* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://builtin.com/artificial-intelligence/strong-ai-weak-ai>
- [14] MADIEGA, Tambiama. General-purpose artificial intelligence. *European Parliamentary Research Service* [online]. 2023, **2** [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/745708/EPRS\\_ATA\(2023\)745708\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/745708/EPRS_ATA(2023)745708_EN.pdf)
- [15] AZUMA, Ronald T. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* [online]. 1997, **6**(4), 355-385 [cit. 2023-11-12]. ISSN 1054-7460. Dostupné z: doi:10.1162/pres.1997.6.4.355
- [16] VITAL, Rebeka, Stella SYLAIU, Dimitrios KOUKOPOULOS, Konstantinos KOUKOULIS, Panagiotis DAFIOTIS a Christos FIDAS. Comparison of extended reality platforms and tools for viewing and exhibiting art. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* [online]. 2023, **31** [cit. 2023-11-12]. ISSN 22120548. Dostupné z: doi:10.1016/j.daach.2023.e00298
- [17] BHATTI, Ghanishtha, Harshit MOHAN a R. RAJA SINGH. Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, **141** [cit. 2023-11-12]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.110801
- [18] BHATTI, Ghanishtha, Harshit MOHAN a R. RAJA SINGH. Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, **141** [cit. 2023-11-12]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.110801

- [19] HWANG, Foo Shen, Thomas CONFREY, Colin REIDY, Dorel PICOVICI, Dean CALLAGHAN, David CULLITON a Cathal NOLAN. Review of battery thermal management systems in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2024, **192** [cit. 2024-01-05]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2023.114171
- [20] YANG, Guodong, Junqiu LI, Zijian FU a Lin GUO. Adaptive state of charge estimation of Lithium-ion battery based on battery capacity degradation model. *Energy Procedia* [online]. 2018, **152**, 514-519 [cit. 2024-01-06]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2018.09.203
- [21] TANG, Hao, Yichun WU, Yuanfeng CAI, Fanyu WANG, Zequn LIN a Yiru PEI. Design of power lithium battery management system based on digital twin. *Journal of Energy Storage* [online]. 2022, **47** [cit. 2024-01-06]. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2021.103679
- [22] RAJAMANI, Rajesh. *Vehicle Dynamics and Control*. New York: Springer, 2006, 471 s. Mechanical Engineering Series. ISBN 0-387-26396-9.
- [23] AMADI, Eli. *Advanced Electric Drive Vehicles*. International Standard Book Number-13. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. Energy, Power Electronics, and Machines. ISBN 978-1-4665-9770-9.
- [24] NOVOTNÝ, Pavel. *P06 MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ TEKUTIN* [online]. 2023 [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/788242/mod\_resource/content/1/P06-Modelovani\_turbulentniho\_proudeni\_2023.pdf. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [25] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [26] BLUMRICH, Reinhard, Matthias RIEGEL a Martin HELFER. Advanced Aeroacoustic Vehicle Development in a Full-Scale Wind Tunnel. *ATZextra worldwide* [online]. 2016, **21(S1)**, 38-43 [cit. 2024-01-16]. ISSN 2195-1470. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s40111-016-0005-1
- [27] DIETSCHKE, Karl-Heinz a Konrad REIF. *Automotive handbook*. 11th edition. Karlsruhe: Bosh, 2022. ISBN 978-1-119-91190-6.
- [28] WITHAM, Gordon, Daniel Ludwig SWIERC, Anna ROZUM a Lutz ECKSTEIN. Integration of Real Driving Data into the Electric Powertrain Design Process for Heavy-duty Trucks. *Konference Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2023* [online]. 2023, **32** [cit. 2024-01-21]. Dostupné z: doi:10.18154/RWTH-2024-00091

- [29] JAMES, Sebastian S., Sean R. ANDERSON a Mauro Da LIO. Longitudinal Vehicle Dynamics: A Comparison of Physical and Data-Driven Models Under Large-Scale Real-World Driving Conditions. *IEEE Access* [online]. 2020, **8**, 73714-73729 [cit. 2024-02-11]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2020.2988592
- [30] IBRAHIM, Mahmoud, Hadi Ashraf RAJA, Anton RASSÖLKIN, Toomas VAIMANN a Ants KALLASTE. An EV-Traction Inverter Data-Driven Modelling for Digital Twin Development. *2023 23rd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2023, 2023-5-24, 1-5 [cit. 2024-02-06]. ISBN 979-8-3503-3593-4. Dostupné z: doi:10.1109/EPE58302.2023.10149230
- [31] LAUBER, Josef, R. NEŠPOR, Zdeněk, ed. Řetězce Markovy. *Sociologický Ústav AV ČR* [online]. 11.12.2017 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: [https://encyklopedie.soc.cas.cz/w/%C5%98et%C4%Bzce\\_Markovovy](https://encyklopedie.soc.cas.cz/w/%C5%98et%C4%Bzce_Markovovy)
- [32] ZHU, Letao, Zechang SUN, Xuezhe WEI a Haifeng DAI. A Discussion on a Feedback Mechanism of Estimated OCV in RLS Algorithm Based on Battery Equivalent Circuit Model. *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* [online]. IEEE, 2017, 1-5 [cit. 2024-05-19]. ISBN 978-1-5386-1317-7. Dostupné z: doi:10.1109/VPPC.2017.8330858
- [33] CHEN, Cheng, Rui XIONG, Ruixin YANG a Hailong LI. A novel data-driven method for mining battery open-circuit voltage characterization. *Green Energy and Intelligent Transportation* [online]. 2022, **1**(1) [cit. 2024-05-19]. ISSN 27731537. Dostupné z: doi:10.1016/j.geits.2022.100001
- [34] SUN, Xiangdong, Jingrun JI, Biying REN, Chenxue XIE a Dan YAN. Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery. *Energies* [online]. 2019, **12**(12) [cit. 2024-05-19]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12122242
- [35] ROZAQI, Latif a Estiko RIJANTO. SOC estimation for Li-ion battery using optimum RLS method based on genetic algorithm. *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* [online]. IEEE, 2016, 1-4 [cit. 2024-05-19]. ISBN 978-1-5090-4139-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICITEED.2016.7863224
- [36] XIONG, Rui, Fengchun SUN, Xianzhi GONG a Chenchen GAO. A data-driven based adaptive state of charge estimator of lithium-ion polymer battery used in electric vehicles. *Applied Energy* [online]. 2014, **113**, 1421-1433 [cit. 2024-05-19]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2013.09.006
- [37] CHEN, Xiaokai, Hao LEI, Rui XIONG, Weixiang SHEN a Ruixin YANG. A novel approach to reconstruct open circuit voltage for state of charge estimation of lithium ion batteries in electric vehicles. *Applied Energy* [online]. 2019, **255** [cit. 2024-05-19]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.113758

- [38] *VDI Heat Atlas* [online]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 [cit. 2024-05-20].  
Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-77877-6

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A, B$	[-]	Parametrizované matice první stavové rovnice
$A_f$	[m <sup>2</sup> ]	Obsah čelní plochy vozidla
$AGI$		Obecná umělá inteligence
$AI$		Umělá inteligence
$ANI$		Omezená umělá inteligence
$ANN$		Umělá neuronová síť
$a_x$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení vozidla v podélném směru
$BMS$		System pro řízení baterie
$C, D$	[-]	Parametrizované matice druhé stavové rovnice
$C_1$	[F]	Kapacity kondenzátoru $C_1$ v RC větvi
$Cap(t)$	[F]	Aktuální kapacita baterie v průběhu simulace
$Cap_{mit}$	[F]	Hodnota kapacity na začátku simulace
$Cap_{max}$	[F]	Maximální kapacity baterie
$C_d$	[-]	Koeficient (součinitel) aerodynamického odporu
$DD$		Digitální dvojče
$DDM$		Datově řízené modelování
$DDM$		Data-driven modeling
$DM$		Digitální model
$DS$		Digitální stín
$e_i$	[-]	Koeficient hmotnosti ekvivalentní hmotnosti rotačních hmot
$EV$		Elektrické vozidlo
$F_a$	[N]	Síla potřebná pro zrychlení vozidla
$F_{air}$	[N]	Aerodynamický odpor
$F_b$	[N]	Brzdná síla
$F_{cl}$	[N]	Odpor stoupání
$F_g$	[N]	Síla odporu stoupání
$F_h$	[N]	Odporová síla vlivem sklonu vozovky
$FOC$		Řízení podle magnetického pole
$F_r$	[N]	Síla valivého odporu kol
$f_r$	[-]	Součinitel valivého odporu
$F_r$	[N]	Valivý odpor
$F_{rf}$	[N]	Síla valivého odporu kol na přední nápravě
$F_{rr}$	[N]	Síla valivého odporu kol na zadní nápravě

$F_t$	[N]	Celková hnací síla na kolech hnací nápravy
$F_{vz}$	[N]	Síla aerodynamického odporu vozidla
$F_{xf}$	[N]	Hnací síla přední nápravy
$F_{xr}$	[N]	Hnací síla zadní nápravy
$F_z$	[N]	Normálová síla zatížení
$F_{zf}$	[N]	Normálová síla (dynamické zatížení) přední nápravy
$F_{zr}$	[N]	Normálová síla (dynamické zatížení) zadní nápravy
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Tíhové zrychlení
$h$	[m]	Výška těžiště vozidla
$h_n$	[m]	Nadmořská výška
<i>HVAC</i>		Systém pro vytápění a chlazení kabiny
$I_{bat}$	[A]	Proud v obvodu
$I_d$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti spojovacích hřídelí
$I_e$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti motoru
<i>IMU</i>		Inerciální měřicí jednotka
<i>IoT</i>		Internet věcí
<i>IPMSM</i>		Synchronní motor s permanentními magnety
$I_{st}$	[A]	Stejnoseměrný proud na vstupu do střídače
$I_t$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti převodovky
$I_w$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti hnacího kola
$k_D$	[kg·m <sup>-1</sup> ]	Koeficient odporu
$k_\tau$	[m <sup>-1</sup> ]	Koeficient hnací síly
$l_f$	[m]	Vzdálenost přední nápravy (bodu F) od těžiště vozidla
$l_r$	[m]	Vzdálenost zadní nápravy (bodu R) od těžiště vozidla
$m$	[kg]	Provozní hmotnost vozidla
$m_{cargo}$	[kg]	Hmotnost nákladu
<i>MCMC</i>		Markov chain Monte Carlo
<i>MDM</i>		Fyzikálně založené modelování
<i>MDM</i>		Model-driven modeling
$M_F$	[N·m]	Výsledný moment v bodě F
$M_R$	[N·m]	Výsledný moment v bodě R
$M_t$	[N·m]	Točivý moment elektromotoru
$m_{veh}$	[kg]	Hmotnost vozidla
$N_f$	[-]	Převodový poměr stálého převodu
$n_m$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky elektromotoru



$N_t$	[-]	Převodový poměr převodovky
$N_{if}$	[-]	Celkový převodový poměr převodovky a stálého převodu
$OCV$	[V]	Napětí na zdroji
$p(h_n)$	[Pa]	Tlak vzduchu funkcí nadmořské výšky
$PeI$	[W]	Elektrický výkon
$PLM$		Řízení životního cyklu výrobku
$P_{mech}$	[W]	Mechanický výkon
$PMSM$		Elektromotor s permanentními magnety
$PWM$		Pulzně šířková modulace
$r$	[m]	Poloměr kola hnací nápravy
$R_t$	[Ohm]	Odpor na rezistoru $R_1$ v RC větvi
$R_t$	[Ohm]	Odpor na sériovém rezistoru $R_1$
$r_{dyn}$	[m]	Dynamický poloměr kola
$RLS$		Rekurzivní metoda nejmenších čtverců
$RMSE$		Střední kvadratická odchylka
$SoC$		Stav nabití
$SoC$	[-]	Aktuální hodnota SoC v průběhu simulace
$SoC_{mit}$	[-]	Hodnota SoC na začátku simulace
$SoL$		Životnost
$SoP$		Dostupný výkon
$SRTM$		Shuttle Radar Topography Mission
$SUV$		Sportovní užitkové vozidlo
$T_e$	[N·m]	Krouticí moment motoru (měřený na dynamometru)
$T_{wheel}$	[N·m]	Hnací moment na kolech
$u(t)$	[-]	Vstupní vektor
$U_1$	[V]	Úbytek napětí na RC větvi
$U_{bat}$	[V]	Výstupní měřené napětí na svorkách
$U_{st}$	[V]	Napětí na vstupu do střídače
$v_0$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost proudu nestlačitelné tekutiny
$VAF$	[%]	Variace závislé proměnné
$var(y)$	[-]	Rozptyl naměřených hodnot rychlostí vozidla
$VR$		Virtuální realita
$v_w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost větru
$v_x$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost vozidla vůči vozovce
$v_x + v_w$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Náporová rychlost

$w_{i,j,k}$	[-]	Koeficient váhy v daném bodě mřížky a k-tém záznamu jízdy
$x(t)$	[-]	Stavový vektor tvořený stavovými veličinami
$x''$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení vozidla v podélném směru
$XR$		Rozšířená realita
$y(t)$	[-]	Výstupní vektor
$y^{\wedge}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost vozidla z modelu
$\Delta p$	[Pa]	Tlaková ztráta proudu
$\eta$	[-]	Společná účinnost motoru se střídačem
$\eta_f$	[-]	Účinnost převodového ústrojí
$\eta_{i,j,k}$	[-]	Účinnost v daném bodě mřížky a k-tém záznamu jízdy
$\eta_t$	[-]	Účinnost převodovky
$\eta_{tf}$	[-]	Společná účinnost převodovky a rozvodového ústrojí
$\theta$	[°]	Úhel sklonu vozovky
$\kappa$	[-]	Řád harmonické složky
$\mu_f$	[-]	Koeficient tření přední nápravy
$\mu_r$	[-]	Koeficient tření zadní nápravy
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota tekutiny
$\omega_m$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost elektromotoru