



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce**

**Modelování jízdních vlastností elektromobilu
Citroën Berlingo Electrique
v MATLAB/Simulink**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: Ing. Michal Košík

Bc. Martin Bína

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Martin Bína**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Modelování jízdních vlastností elektromobilu Citroën Berlingo Electricque v MATLAB/Simulink**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proved'te studii literatury k problematice modelování elektromobilů.
- 2) Vytvořte model elektromobilu v prostředí MATLAB/Simulink.
- 3) Proved'te simulaci chování modelu pro různé jízdní cykly.
- 4) Pokud to bude možné, ověřte výstupy simulací měřeními na vozidle.

Seznam odborné literatury:

- [1] Larminie, J., -Lowry, J.: Electric Vehicle Technology Explained, Second Edition, Wiley 2012
- [2] Pavelka, J.: Elektrické pohony, Česká Technika - nakladatelství ČVUT, Praha 2007
- [3] L'Institut Citroën: Berlingo Electricque
- [4] MATLAB Central, < <http://www.mathworks.com/matlabcentral/>>

Vedoucí: Košík Michal

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW apod.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Košíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o elektromobilech, o typu jejich pohonů, o motorech používaných k jejich pohonu, o jízdnicích cyklech používaných k jejich modelování a o problematice samotného modelování. Na úvod práce bude krátce představena historie elektromobilů, možnosti a typy jejich pohonů, druhy motorů a systémy pro ukládání energie. V další části budou představeny jízdnicí cykly používané pro zkoušky automobilů a jejich vlastnosti, poté bude následovat představení elektromobilu určeného k simulování a podrobný popis jednotlivých bloků simulačního prostředí včetně samotného modelu elektromobilu. V poslední části pak bude provedeno vyhodnocení simulace průjezdu jednotlivými jízdnicími cykly a nakonec porovnání jízdy skutečným vozidlem se simulací.

Abstract

This thesis deals with the electric vehicles, the type of drives, engines used to power them, driving cycles used for the modeling and simulation modeling itself. At the beginning of the work will be briefly introduced the history of electric vehicles, types of drives, types of engines and systems for energy storage. The next section will introduce driving cycles used for testing cars and their parameters, then will be followed by introduction of an electric vehicle selected to simulation and detailed description of each block of simulation environment including an electric model itself. In the last part simulation will be evaluated and then comparing the actual vehicle driving simulation.

Klíčová slova

Elektromobil, simulace, modelování, MATLAB, Simulink, jízdní cyklus

Keywords

Electric vehicle, simulation, modeling, MATLAB, Simulink, driving cycle

Obsah

OBSAH.....	9
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK.....	14
SEZNAM ZKRATEK.....	14
ÚVOD.....	15
1 ELEKTROMOBIL.....	16
1.1 POJEM ELEKTROMOBIL.....	16
1.2 ROZDĚLENÍ OSOBNÍCH ELEKTROMOBILŮ.....	17
1.2.1 Uspořádání pohonu	17
1.2.1.1 Motor na zadní nápravě.....	17
1.2.1.2 Motor na přední nápravě	17
1.2.1.3 Kombinace více motorů.....	18
1.2.1.4 Nábojové motory	18
1.2.2 Typy motorů	18
1.2.2.1 Stejnoseměrný sériový.....	19
1.2.2.2 Stejnoseměrný cize buzený	19
1.2.2.3 Stejnoseměrný bezkartáčový (BLDC).....	19
1.2.2.4 Asynchronní motor.....	19
1.2.2.5 Synchronní motor buzený permanentními magnety	20
1.2.3 Systémy pro ukládání energie	20
1.2.3.1 Akumulátory.....	20
1.2.3.2 Superkapacitory.....	21
1.2.3.3 Palivové články.....	21
1.3 PŘEHLED SOUČASNĚ VYRÁBĚNÝCH ELEKTROMOBILŮ.....	22
1.3.1 Malé městské osobní automobily	22
1.3.2 Plnohodnotné automobily.....	24
1.3.3 Sportovně užitkové vozy (SUV)	26
1.3.4 Sportovní automobily	27
1.3.5 Lehká užitková vozidla.....	28
2 ELEKTROMOBIL PRO MODELOVÁNÍ.....	29
2.1 CITROËN BERLINGO ELECTRIQUE.....	29
2.2 MOTOR	30
2.3 TRAKČNÍ AKUMULÁTOR	32
2.4 DALŠÍ SYSTÉMY	33
2.4.1 Posilovač brzd.....	33
2.4.2 Ostatní.....	33
2.5 MĚNIČE	33
2.5.1 Měnič kotvy.....	34
2.5.2 Měnič buzení	34
2.6 DALŠÍ PARAMETRY VOZU PRO SIMULACI.....	35
3 PROSTŘEDÍ PRO MODELOVÁNÍ JÍZDNÍCH VLASTNOSTÍ.....	36
3.1 JÍZDNÍ CYKLY	37
3.1.1 UDC (ECE-15).....	38
3.1.2 EUDC.....	38

3.1.3	NEDC.....	39
3.1.4	Artemis Urban Cycle.....	39
3.1.5	Artemis Rural Cycle	40
3.1.6	Artemis Highway Cycle.....	41
3.1.7	SFUD	41
3.1.8	HWFET.....	41
3.1.9	Porovnání jízdních cyklů	42
3.2	MODEL ELEKTROMOBILU.....	43
3.2.1	Regulátory rychlosti a momentu	43
3.2.1.1	Regulátor rychlosti a výpočet žádaného momentu.....	43
3.2.1.2	Přepočet žádaného momentu na žádaný proud.....	45
3.2.2	Regulátory kotevního a budícího proudu.....	45
3.2.2.1	Regulátor kotevního proudu	46
3.2.2.2	Regulátor žádaného budícího proudu.....	47
3.2.2.3	Regulátor budícího proudu.....	47
3.2.3	Motor a převodovka	47
3.2.3.1	Model obvodu kotvy	47
3.2.3.2	Model obvodu buzení	48
3.2.3.3	Převodovka.....	48
3.2.4	Brzda	49
3.2.5	Battery Management System (Trakční akumulátor).....	49
3.2.6	Pomocné elektrické spotřebiče.....	50
3.2.7	Výpočet žádaného výkonu.....	51
3.3	MECHANIKA A DYNAMIKA	52
3.3.1	Jízdní odpory.....	53
3.3.1.1	Valivý odpor	53
3.3.1.2	Aerodynamický odpor.....	53
3.3.1.3	Odpor stoupání	54
3.3.2	Mechanika.....	54
3.3.2.1	Výpočet dynamické síly	54
3.3.2.2	Výpočet zrychlení.....	55
3.3.2.3	Výpočet ujeté vzdálenosti.....	55
3.4	VÝPOČTY A VÝSTUPY SIMULACE	55
3.4.1	Výpočet výkonu a příkonu	55
3.4.2	Výpočet spotřeby	56
3.4.3	Výpočet účinnosti.....	57
4	CHOVÁNÍ MODELU PŘI RŮZNÝCH JÍZDNÍCH CYKLECH.....	59
4.1	JÍZDNÍ CYKLY	59
4.1.1	Jízdní cyklus ECE-15	60
4.1.2	Jízdní cyklus EUDC.....	61
4.1.3	Jízdní cyklus NEDC	62
4.1.4	Jízdní cykly Artemis Urban	63
4.1.5	Jízdní cykly Artemis Rural.....	64
4.1.6	Americký jízdní cyklus SFUD.....	65
4.1.7	Americký jízdní cyklus HWFET	66
4.2	POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z JEDNOTLIVÝCH JÍZDNÍCH CYKLŮ	67
5	MĚŘENÍ NA VOZIDLE	69
	ZÁVĚR.....	71

ZDROJE	73
ZDROJE OBRÁZKŮ	75
STRUKTURA PŘILOŽENÉHO CD.....	77
PŘÍLOHY	78

Seznam obrázků

Obr. 1 Nábojový motor	18
Obr. 2 Norge Buddy Cab	22
Obr. 3 VW e-up!.....	23
Obr. 4 Renault ZOE	24
Obr. 5 Nissan Leaf	25
Obr. 6 BMW Brilliance Zinoro 1E	26
Obr. 7 Tesla Roadster	27
Obr. 8 Navistar eStar electric van.....	28
Obr. 9 Citroën Berlingo Electrique.....	29
Obr. 10 Řez trakčním motorem a reduktorem (převodovkou)	30
Obr. 11 Řídicí charakteristika motoru (při konstantním momentu a výkonu).....	31
Obr. 12 Schéma chlazení akumulátorů (1 – chladič, 2,3 – čerpadla, 4 – expanzní nádoba).....	32
Obr. 13 Blokové schéma řízení a měničů	34
Obr. 14 Model v Simulinku.....	36
Obr. 15 Blok jízdních cyklů	37
Obr. 16 Jízdní cyklus UDC (ECE-15)	38
Obr. 17 Jízdní cyklus EUDC	38
Obr. 18 Jízdní cyklus NEDC	39
Obr. 19 Jízdní cyklus Artemis Urban.....	40
Obr. 20 Mimoměstský jízdní cyklus Artemis Rural.....	40
Obr. 21 Jízdní cyklus SFUD.....	41
Obr. 22 Jízdní cyklus HWFET	42
Obr. 23 Model elektromobilu.....	43
Obr. 24 Blokové schéma regulátoru rychlosti.....	44
Obr. 25 Regulátor rychlosti.....	44
Obr. 26 Blok přepočtu žádaného momentu na proud	45
Obr. 27 Blokové schéma regulátorů kotevního a budícího proudu	46
Obr. 28 PS regulátor kotevního proudu.....	46
Obr. 29 Regulátor žádaného budícího proudu.....	47
Obr. 30 Model kotevního a budícího obvodu	48
Obr. 31 Převod momentu na hřídeli na sílu na kolech	49
Obr. 32 Model mechanické brzdy.....	49
Obr. 33 Model jedné sériové větve akumulátoru.....	50
Obr. 34 Pomocné elektrické spotřebiče.....	51
Obr. 35 Výpočet žádaného výkonu	52
Obr. 36 Blok mechaniky a dynamiky	52
Obr. 37 Valivý odpor.....	53
Obr. 38 Aerodynamický odpor	53
Obr. 39 Výpočet dynamické síly.....	54
Obr. 40 Subsystem výpočtu příkonu pohonu a příkonu celého vozu.....	56
Obr. 41 Blok výpočtu spotřeb	57
Obr. 42 Subsystem výpočtu účinností	58
Obr. 43 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu ECE-15.....	60
Obr. 44 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu ECE-15 (UDC)	60

Obr. 45 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu EUDC	61
Obr. 46 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu EUDC.....	61
Obr. 47 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu NEDC	62
Obr. 48 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu NEDC.....	62
Obr. 49 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu Artemis Urban	63
Obr. 50 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu Artemis Urban	63
Obr. 51 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu Artemis Rural	64
Obr. 52 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu Artemis Rural	64
Obr. 53 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu SFUD	65
Obr. 54 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu SFUD	65
Obr. 55 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu HWFET	66
Obr. 56 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu HWFET.....	66
Obr. 57 Průběhy naměřené reálným elektromobilem.....	69
Obr. 58 Nasimulované hodnoty rychlosti, kotevního a budícího proudu.....	70
Obr. 59 Nasimulované průběhy napětí a proudu baterií.....	70

Seznam tabulek

Tabulka 1 Malé městské osobní automobily 1.....	22
Tabulka 2 Malé městské osobní automobily 2.....	23
Tabulka 3 Plnohodnotné automobily 1	24
Tabulka 4 Plnohodnotné automobily 2	25
Tabulka 5 SUV	26
Tabulka 6 Sportovní automobily	27
Tabulka 7 Lehká užitková vozidla.....	28
Tabulka 8 Parametry motoru.....	30
Tabulka 9 Další parametry pro simulaci	35
Tabulka 10 Porovnání jízdních cyklů	42
Tabulka 11 Seznam měřených veličin.....	59
Tabulka 12 Naměřené hodnoty v simulaci.....	67
Tabulka 13 Použité symboly	78

Seznam zkratk

Obr.	obrázek
Tab.	Tabulka
NEDC	New European Driving Cycle
AWD	All Wheels Drive, pohon všech kol
BLDC	BrushLess DC, stejnosměrný bezkartáčový motor
UDC	Urban Driving Cycle
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
HWFET	Highway Fuel Economy Test
BMS	Battery Management System
DTC	Direct Torque Control, přímé řízení momentu

Úvod

V této diplomové práci se budu zabývat problematikou elektromobilů, zejména jejich modelováním. K volbě tématu mne vede současný trend rozvoje elektromobility. Elektromobilita znamená pohyb díky elektrické energii, patří sem tedy provoz elektrických vozidel. Hlavním důvodem rozvoje elektromobility je absence produkce lokálních emisí, což je výhodné z hlediska ekologie především v centrech měst. Výhodou je též výrazně nižší hluk v porovnání s vozidly se spalovacími motory.

Elektromobily byly vynalezeny před skoro 200 lety, ale na rozdíl od vozidel se spalovacími motory se za dobu své existence kvůli silné konkurenci ze strany aut se spalovacími motory příliš nevyvíjely. To se děje největší měrou až v posledních několika desetiletích, kdy dochází k rozvoji akumulátorů a zároveň k podpoře ekologické dopravy. To je důvod, proč se elektromobilitě věnuji ve svou práci. Cílem této práce je představit způsoby pohonu elektromobilů a základní typy elektromotorů, jakými mohou být elektromobily vybaveny, a porovnat jejich vlastnosti. Dalším cílem je navrhnutí simulačního prostředí pro modelování elektromobilů z hlediska jejich výkonových parametrů a spotřeby a porovnání výsledků simulací se skutečným vozidlem. Simulováno je vozidlo Citroën Berlingo Electrique, elektromobil ve vlastnictví katedry.

Hlavním cílem práce je vytvoření co nejpřesnějšího modelu zmíněného elektromobilu v prostředí MATLAB/Simulink. Na tomto elektromobilu pracují moji kolegové, kteří navrhli a postavili trakční měnič pro tento elektromobil, můj model bude sloužit k porovnání elektrických i jízdních vlastností. Chování modelu a reálného vozidla bude porovnáno v závislosti na různých jízdních cyklech. Simulace bude zahrnovat i vybíjení akumulátoru a rekuperaci v případě snižování rychlosti, takže akumulátory se mohou během zpomalování i dobíjet.

V této práci nejprve ve zkratce představím historii a současný stav elektromobilů, představím základní možnosti pohonu elektromobilů a používané typy elektromotorů. Poté bude následovat detailnější popis a parametry vozidla, které jsem si pro simulování vybral, tedy Citroënu Berlingo Electrique. Hlavní částí práce je potom simulační prostředí a model samotného elektromobilu, jehož chování budu simulovat ve standardizovaných jízdních cyklech. Výsledky ze simulací poté porovnáám jak mezi sebou, tak i s hodnotami naměřenými při jízdě skutečného elektromobilu.

1 Elektromobil

1.1 Pojem elektromobil

Elektrické vozidlo (zkráceně elektromobil) je vozidlo poháněné výhradně elektrickou energií. Akčním členem, který přeměňuje elektrickou energii na mechanickou, je v tomto případě elektromotor. Zdrojem elektrické energie je nejčastěji akumulátor, pak se jedná o tzv. bateriový elektromobil.^[4]

První elektromobil byl vyroben v roce 1835 v Nizozemsku, což bylo dříve, než vznikla vozidla se spalovacím motorem. I po zahájení jejich výroby byly elektromobily stále oblíbenější, to se změnilo až kolem roku 1910, kdy se v USA začal sériově vyrábět Ford model T, který byl spolehlivější, levnější a měl větší dojezd. Tím nastal útlum elektromobilů, další větší rozvoj byl až kolem roku 1990 díky legislativě zvýhodňující elektromobily v USA, ale netrval dlouho, protože výhodné podmínky byly záhy zrušeny. Poslední výrazný rozvoj začal celosvětově v posledním desetiletí, a to jak z důvodu pokroku v oblasti lithiových akumulátorů, tak i díky podpoře ekologické dopravy.^[4]

V porovnání s vozidly se spalovacím motorem má elektromobil mnoho výhod. Hlavní výhodou jsou nízké provozní náklady, a to zprv díky levnému „palivu“, protože cena elektřiny je srovnatelná s cenou benzínu bez spotřebních daní (které se více jak z poloviny podílejí na ceně benzínu), a zadruhé díky nízkým nákladům na údržbu, protože u elektrického pohonu odpadají výměny olejů, rozvodových řemenů, chladicí kapaliny, zapalovacích svíček apod. Mezi další výhody patří i vysoký krouticí moment od nulových otáček, možnost rekuperace (vracení energie zpět do akumulátoru) nebo nízká hlučnost pohonu. Elektromobily mají ale i nevýhody, tou hlavní je akumulátor. Měrná energie uložená v akumulátorech je výrazně nižší, než v benzínu, proto abychom měli elektromobil s dojezdem odpovídajícím 40 litrové nádrži s benzínem, potřebovali bychom na to více jak 500 kg moderních lithiových akumulátorů. I když se díky velkým investicím do vývoje kapacita akumulátorů stále zvyšuje, stále mají dnešní elektromobily nízký dojezd ve srovnání s auty se spalovacími motory. Akumulátory jsou také nejdražší součástí elektromobilu a mají nejkratší životnost, i u moderních se uvádí zpravidla 100 až 150 tisíc kilometrů. Neznamená to ale ovšem, že se pak baterie vyhodí, na konci životnosti klesne jejich kapacita na 80% původní hodnoty, takže se ještě dají používat, nebo jsou dále využitelné například pro ukládání energie.^[4]

Přechod mezi auty se spalovacím motorem a elektromobily tvoří hybridní elektromobily. Tato vozidla mají spalovací motor, akumulátory i elektromotor a kombinují výhody vozů se spalovacím motorem, což jsou velký dojezd a možnost tankování v husté síti čerpacích stanic, a výhody elektromobilů, což jsou hlavně rekuperace energie při zpomalování a nulová spotřeba stojícího vozidla. Většinou mají hybridní vozy řešeno dobíjení akumulátorů za provozu, kdy se do nich ukládá brzděná energie, případně je lze dobít energií ze spalovacího motoru při zvýšené spotřebě paliva, ale v posledních letech se rozšiřují i tzv. plug-in hybridy, které umožňují dobíjení akumulátorů přímo. Pokud tedy majitel chce a má k dispozici dobíjecí stanice (nebo síťové zásuvky), může takový hybrid trvale provozovat jako čistý elektromobil.

V současnosti je většina sériově vyráběných elektromobilů vyráběna úpravou modelů se spalovacím motorem a pouze malá část je od počátku koncipovaná jako elektromobil. Vozidla koncipovaná od začátku jako elektromobil mají většinou výhodu v lepších jízdních vlastnostech, protože nejtěžší součást – akumulátor – mají umístěnou pod podlahou a ve středovém tunelu a rovnoměrně rozprostřenou po větší části podvozku, díky čemuž mají nízké těžiště. U upravených spalovacích aut jde většinou o kompromis mezi jízdními vlastnostmi a náklady na úpravu. Původní

elektromobily také mají lepší aerodynamiku předě, v níž nebylo nutné počítat s průduchy vzduchu pro sání a chlazení spalovacího motoru. Mezi tyto automobily patří například současné elektromobily Nissan Leaf, BMW i3 nebo všechny vozy automobilky Tesla Motors. [25]

1.2 Rozdělení osobních elektromobilů

Elektromobily lze rozdělit z různých úhlů pohledu do několika skupin. Dají se dělit například podle uspořádání pohonu. Poháněná může mít pouze přední náprava, pouze zadní náprava, obě nápravy nebo mohou být motory v jednotlivých kolech. Další možnost dělení je podle použité technologie motoru. Energie uskladněná v akumulátorech, superkapacitorech, palivových článcích či jiných systémech pro uložení energie dodává výhradně stejnosměrné napětí, proto měly první elektromobily stejnosměrné motory. Později s rozvojem polovodičové techniky vznikly výkonné a cenově dostupné střídače, které umožnily zástavbu střídavých nebo stejnosměrných bezkartáčových motorů, jejichž hlavní výhodou je, že rotor není nijak galvanicky spojen se statorem, díky čemuž jsou tyto motory naprosto bezúdržbové a mají životnost překračující životnost vozidla. Další možností dělení elektromobilů je podle principu, jakým je uložena elektrická energie. Zdaleka nejrozšířenější je ukládání energie do akumulátorů, ale vyskytují se i elektromobily s palivovými články nebo superkapacity, jedná se ale o okrajovou část, která je stále ve výzkumu a vývoji.[4]

1.2.1 Uspořádání pohonu

V následujících kapitolách budou krátce představeny nejrozšířenější možnosti uspořádání pohonu elektromobilu.

1.2.1.1 Motor na zadní nápravě

Tato koncepce není příliš rozšířená a je zastoupená hlavně u vozidel, která byla od počátku vývoje koncipovaná jako elektromobily. Nejznámějším zástupcem této kategorie je automobilka TESLA Motors, ať už se jedná o nejznámější model S, nebo dřívější sportovní vůz Tesla Roadster.[25] Toto uspořádání pohonu je výhodné z hlediska jízdních vlastností a rozložení těžiště.

1.2.1.2 Motor na přední nápravě

Koncepce elektromobilu s pohonem předních kol je nejrozšířenější. Není to kvůli tomu, že by to bylo výhodné, ale spíše z důvodu, že nemalá část sériově vyráběných elektrických vozidel vznikla úpravou vozidel se spalovacím motorem, které měly motor vpředu a pod ním hnanou přední nápravu. Díky tomu je pro výrobce vůz snazší na výrobu, protože využívá rozvodovku a diferenciál z původního auta se spalovacím motorem, což se příznivě odráží v ceně. Může mít ale horší trakční vlastnosti.

1.2.1.3 Kombinace více motorů

Tato koncepce je z hlediska jízdních vlastností nejlepší. Řídící počítač díky ní může ovládat točivý moment každé nápravy nezávisle a tím zajistit nejlepší možné jízdní vlastnosti za každé situace a na každém povrchu.

V takovém případě se nevyužívá jednoho motoru, který přes mezinápravový diferenciál pohání obě nápravy, jako je tomu u vozů 4x4 se spalovacím motorem. Místo toho se využívá buď dvou motorů, kde každý pohání jednu nápravu, nebo čtyř menších motorů, kde každý pohání jedno kolo, případně kombinace obou zmíněných řešení. Dva elektromotory využívá AWD verze elektromobilu Tesla Model S [25], kde je zadní náprava poháněna hlavním velkým elektromotorem a přední náprava menším asistenčním elektromotorem.

1.2.1.4 Nábojové motory

Nábojové motory jsou umístěné, jak již z jejich názvu vyplývá, přímo v náboji kola. Tyto motory jsou výhradně bezkartáčové (bezkroutkové) a inverzní, což znamená, že stojící stator je uprostřed a kolem něho se točí rotor. Protože rotor není galvanicky spojen se státorem, tak v nich zajišťují potřebný budící tok permanentní magnety. Díky tomu má motor vyšší účinnost, ale je nutné monitorovat teplotu, protože při vyšších teplotách nevratně ztrácejí permanentní magnety ze vzácných zemin svoje magnetické vlastnosti. Motor je za stator přimontovaný k nápravě a na rotoru je umístěn ráfek s pneumatikou. Výhodou je nezávislé ovládání momentu každého kola, což výrazně zlepšuje jízdní vlastnosti, problémem může být naopak nárůst neodpružené hmotnosti vozidla, což jízdní vlastnosti zase o něco zhoršuje. [26]



Obr. 1 Nábojový motor

1.2.2 Typy motorů

V následujících podkapitolách představím jednotlivé typy motorů používané v elektromobilech a jejich výhody a nevýhody v této aplikaci.

1.2.2.1 Stejnoseměrný sériový

Stejnoseměrný sériový motor má budící vinutí zapojeno sériově s kotvou a proto jsou obě vinutí protékána stejným proudem.

Rychlostní charakteristika tohoto motoru je pro elektrickou trakci (pro jakékoli elektrické trakční vozidlo – lokomotiva, tramvaj, trolejbus apod.) nejvhodnější, protože má tzv. měkký průběh. Při připojení napětí je jeho moment kvadraticky závislý na proudu a přitom nepřímě úměrný otáčkám. Reverzaci otáčení nelze provést pouhou změnou polaritu na svorkách motoru, protože by se změnil směr proudu v budícím i kotevním obvodu, a smysl otáčení by tak zůstal stejný, místo toho se musí budící vinutí odpojit a připojit obráceně.^[1]

Hlavní nevýhodou sériového motoru je mechanický komutátor, který je nejslabším místem motoru a vyžaduje častou kontrolu a údržbu. Další nevýhodou může být i systém odbuzování. Jelikož je proud kotvy zároveň proudem budícím, je nutné jeho část při odbuzování vést jinudy, nejčastěji přes tzv. shuntovací rezistor, kde je část kotevního proudu mařena v teplo, čímž se snižuje účinnost motoru.

1.2.2.2 Stejnoseměrný cize buzený

Cize buzený stejnoseměrný motor má nezávislý obvod pro kotvu a pro buzení. Budící tok může být zajištěn i permanentními magnety, což je energeticky výhodné (není nutné budit elektromagnety), na druhou stranu tím ale ztrácíme možnost odbuzování pro dosažení vyšších otáček.^[21]

Hnací moment tohoto typu motoru je lineárně závislý na kotevním proudu, takže elektromobil vybavený tímto motorem vyžaduje citlivé řízení momentu. Výhodou je lepší odbuzování pomocí změny napětí na svorkách buzení, případně snadná reverzace jeho přepólováním.^[1]

Stejně jako u výše zmíněného sériového motoru je hlavní nevýhodou elektrické spojení rotoru se statorem pomocí komutátoru a kartáčů, které se opotřebovávají a vyžadují údržbu, případně i výměnu.^[1]

1.2.2.3 Stejnoseměrný bezkartáčový (BLDC)

Tento typ motoru je stejně jako předchozí napájen stejnoseměrným napětím, ale na rozdíl od nich už nemá elektrické spojení mezi rotorem a statorem v podobě komutátoru, díky čemuž je bezúdržbový. Jeho rotor je tvořen permanentními magnety, na statoru jsou statorové póly. Jelikož ale nemá mechanický komutátor, který by přepínal polaritu cívek čistě mechanicky podle polohy rotoru, je toto nutné zajistit polovodičovými spínači, proto se tento typ motoru jinak také nazývá elektronicky komutovaný motor. Na rozdíl od předchozích stejnoseměrných motorů se už neobejde bez řídicí elektroniky, která pomocí senzorů zjišťuje, v jaké pozici se nachází rotor, a podle toho spíná jednotlivé statorové póly.^[26]

1.2.2.4 Asynchronní motor

Asynchronní motor je motor pracující na střídavé (zpravidla třífázové) napětí, zatímco napětí dodávané zdrojem napětí elektromobilu (akumulátor, superkapacitor, palivový článek apod.) je výlučně stejnoseměrné, proto k jeho řízení nestačí jen obyčejný stejnoseměrný měnič napětí, jako u

stejnosemárných motorů, ale je nutný střídač. Tyto střídače umožňují generovat proměnnou frekvenci a fungují tak jako měniče kmitočtu. Existuje mnoho způsobů řízení momentu a rychlosti, v dnešní době převažuje vektorové řízení a přímé řízení momentu (DTC).^[1]

Největší výhodou asynchronního motoru je, že na jeho rotor nemusí být přiváděno mechanicky napětí (u klecového motoru s kotvou nakrátko, který se u elektromobilů výhradně používá). Nevýhodami může být složitější řízení pomocí střídače a s ním spojené vyšší pořizovací náklady.^[1]

Použití tohoto motoru v elektromobilech není příliš časté, ale jednou z mála automobilek, které ho ve svých vozech využívají, je společnost Tesla Motors.^[25]

1.2.2.5 Synchronní motor buzený permanentními magnety

Střídavý synchronní motor potřebuje k provozu stejně jako asynchronní motor střídač. Jeho konstrukce je podobná stejnosměrnému bezkartáčovému motoru, při použití rotoru s permanentními magnety nepotřebuje kroužky ani kartáče, kterými by přenášel energii na rotor, navíc u něj lze pomocí vhodného řízení napětí a proudu v jednotlivých fázích statorového vinutí docílit efektu odbuzování. Pokud je motor spojen s hřídelí kola pevně (bez spojky), může být menší nevýhoda nemožnost vlečení v případě poruchy (zkratu) motoru, vozidlo lze pouze naložit na odtahový vůz. I v odpojeném motoru se totiž kvůli magnetickému poli rotoru při pohybu indukují nebezpečné napětí.^[1]

Jedná se o nejčastěji využívaný typ motoru mezi výrobci sériových komerčních elektromobilů, využívají ho například automobilky Volkswagen, Daimler-Benz, Mitsubishi, Ford, BMW nebo Nissan.^[5,9,10,11,12,13,14,15]

1.2.3 Systémy pro ukládání energie

V následujících odstavcích budou představeny nejčastější technologie, pomocí kterých je ve vozidle uložena elektrická energie pro pohon. Jedná se o tři základní systémy, a to akumulátory, superkapacitory a palivové články.

1.2.3.1 Akumulátory

Akumulátor je nejčastěji používanou zásobárnou energie elektromobilu. Existuje několik typů akumulátorů, které byly s úspěchem využívány v elektromobilech

Olovené akumulátory. Tyto akumulátory jsou vývojově nejstarší a tomu odpovídají i jejich parametry. Kvůli olovu použitému jako materiál elektrod jsou v poměru ke své kapacitě velmi těžké a rozměrné. Nevýhodou je i nízký počet nabíjecích cyklů za životnost, obvykle se uvádí 500. Výhodou může být nenáročnost na parametry nabíječky, což se týče nabíjecí charakteristiky a přesnosti nabíjecího napětí. Používaly se jako zdroj energie u prvních elektromobilů, dodnes se používají pro pohon ve všelijakých skladových a nádražních vozítkách, nakladačích a vysokozdvihných vozících.

Niklové akumulátory NiCd a NiMH. Oproti oloveným akumulátorům mají při stejné kapacitě výrazně menší rozměry (méně než poloviční) a měrnou hmotnost (NiMH přibližně o polovinu, NiCd jsou o trochu těžší než NiMH). Životnost NiCd akumulátorů je srovnatelná

s olovenými, mají ale výhodu, že snášejí dlouhodobé hluboké vybití bez výrazného vlivu na životnost.^[35] NiMH akumulátory tuto schopnost nemají, ale místo toho vydrží až dvojnásobek nabíjecích cyklů (1000).^[34] NiMH baterie byly použité například u prvních generací hybridního elektromobilu Toyota Prius^[33].

Lithiové akumulátory. Tyto akumulátory byly objeveny už před dlouhou dobou, ale zaznamenaly rozvoj až v posledních několika desetiletích díky stabilizaci pevného lithia. To jinak na vzduchu reaguje za prudkého vývinu tepla. Ve srovnání s výše zmíněnými typy akumulátorů mají lithiové nejmenší měrný objem i hmotnost a vydrží nejvíce nabíjecích cyklů (podle typu 1000 až 3000). Další výhodou je i vysoké jmenovité napětí článku 3,7 V, což je více než trojnásobek napětí niklových akumulátorů. Díky tomu lze pro dosažení stejného napětí snížit počet článků zapojených do série. Nevýhodou je naopak možné nebezpečí požáru a výbuchu v případě zkratu nebo poškození uvnitř baterie. V současné době jsou akumulátory na bázi lithia v elektromobilech zdaleka nejpoužívanější.^[35]

1.2.3.2 Superkapacitory

Další možností, jak uložit elektrickou energii pro elektromobil, je použití superkapacitorů. Superkapacitor je kondenzátor s mnohonásobně vyšší kapacitou než obyčejný kondenzátor. Jeho výkonová hustota je několikanásobně větší než u lithiového akumulátoru, vydrží mnohonásobně více nabíjecích cyklů a nevadí mu ani obrovské nabíjecí i vybíjecí proudy. Oproti akumulátorům na bázi lithia má ale výrazně menší kapacitu, větší samovybití a má menší napětí jednoho článku (2 až 3 V), což je nevýhoda, protože při sériovém spojování kondenzátorů klesá celková kapacita přímo úměrně s počtem článků v sérii (tedy spojením třech kondenzátorů do série získáme trojnásobné napětí, ale třetinovou kapacitu, na rozdíl od akumulátorů, jejichž sériovým spojováním získáváme vyšší napětí při zachování stejné kapacity).^[27]

Jako nejvhodnější se jeví použití kombinace akumulátoru a superkapacitoru. Akumulátor je vhodné užít jako hlavní zásobárnu energie a superkapacitor na krátkodobé a rychlé pojmутí menšího množství energie, například při prudké akceleraci, prudkém rekuperačním brzdění nebo při rychlonabíjení.

1.2.3.3 Palivové články

Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii přímo na elektrickou energii, ale pouze jednosměrně, tudíž má elektromobil této koncepce blíže spíše ke spalovacím motorům, na druhou stranu neprodukuje žádné lokální emise, což je vlastnost elektromobilů. Nejčastěji se používá s vodíkovým palivem a kyslíkovým okysličovadlem. Tím, že se jedná o přímou přeměnu (ne jako v případě např. motorgenerátoru, kdy se chemická energie paliva přemění ve spalovacím motoru na energii tepelnou a následně mechanickou a nakonec se v generátoru přemění mechanická energie na elektrickou), je docíleno vyšší účinnosti. Do celkové účinnosti ale musíme ale započítat i výrobu vodíku, který se vyrábí nejčastěji elektrolyticky a je energeticky náročná. Další možnou nevýhodou je problematické utěsnění nádrží, molekuly vodíku jsou ve srovnání s ostatními plyny velmi malé a unikají i sebemenšími netěsnostmi. ^[28]

Bylo vyrobeno mnoho prototypů pokusných elektromobilů i elektrobusů na palivové články, ale zatím žádný nebyl natolik úspěšný, aby překonal nebo se alespoň vyrovnal akumulátorem poháněným vozidlům a dostal se do sériové výroby.

1.3 Přehled současně vyráběných elektromobilů

V této kapitole jsou zmíněny používané základní kategorie osobních elektromobilů (malé městské automobily, plnohodnotné automobily, sportovně užitkové vozy, sportovní vozy a lehká užitková vozidla) a jsou shrnuty všechny jejich důležité parametry.

1.3.1 Malé městské osobní automobily



Obr. 2 Norge Buddy Cab

Tabulka 1 Malé městské osobní automobily 1

	1.	2.	3.
Výrobce:	Vehicule Électriques Pininfarina Bolloré	Kandi	Daimler
Typ:	Bluecar	KD-5010	Smart Fortwo electric drive
Země výroby:	Itálie	ČLR	Německo
Rok zahájení výroby:	2011	2014	2009
Vyrobeno kusů (k datu):	3 890 (konec ledna 2015)	spolu s dalšími podtypy 14 398 (konec r. 2014)	---
Typ a počet motorů:	jeden synchronní	jeden asynchronní	Jeden synchronní
Hnaná náprava:	přední	zadní	zadní
Výkon jmenovitý:	35 kW	7,5 kW	
Výkon špičkový:	50 kW		55 kW
Kapacita baterie:	30 kWh	8,64 kWh	17,6 kWh
Dojezd:	město: 250 km mimoměsto: 150 km	80 km	140 km
Maximální rychlost:	120 km/h	72 km/h	125 km/h
Váha:	1 120 kg	980 kg	1 100 kg
Oblast prodeje:	Francie	ČLR	Evropa
Dostupný v ČR:	ne	ne	ano
Cena od:	18 300 €	89 800 ¥	
Cena od v Kč:	500 000,-	350 000,-	700 000,-



Obr. 3 VW e-up!

Tabulka 2 Malé městské osobní automobily 2

	4.	5.
Výrobce:	Mitsubishi Motors	Volkswagen
Typ:	Mitsubishi i-MiEV / Peugeot iOn/ Citroën C-Zero/ Subaru O2	Volkswagen e-up!
Země výroby:	Japonsko	Německo
Rok zahájení výroby:	2009	2013
Vyrobeno kusů (k datu):	10 000	Cca 2000
Typ a počet motorů:	Jeden synchronní	Jeden synchronní
Hnaná náprava:	Zadní	Přední
Výkon jmenovitý:	47 kW	40 kW
Výkon špičkový:		60 kW
Kapacita baterie:	16 kWh	18,7 kWh
Dojezd:	160 km	160 km
Maximální rychlost:	130 km/h	130 km/h
Váha:	1 080 kg	1 085 kg
Oblast prodeje:	Evropa, USA, Japonsko	Evropa
Dostupný v ČR:	ne	ano
Cena od:		
Cena od v Kč:	750 000,-	600 000,-

1.3.2 Plnohodnotné automobily



Obr. 4 Renault ZOE

Tabulka 3 Plnohodnotné automobily 1

	1.	2.	3.
Výrobce:	BMW	Ford Motor Company	Volkswagen AG
Typ:	BMW i3	Ford Focus Electric	VW e-Golf
Země výroby:	Německo	USA	Německo
Rok zahájení výroby:	2013	2011	2014
Vyrobena kusů (k datu):	17 529 (konec r. 2014)	4 666 (konec r. 2014)	Cca 5000 (konec r. 2014)
Typ a počet motorů:	jeden synchronní	jeden synchronní	jeden synchronní
Hnaná náprava:	zadní	přední	Přední
Výkon jmenovitý:	75 kW		85 kW
Výkon špičkový:	130 kW	107 kW	
Kapacita baterie:	18,8 kWh	23 kWh	26,5 kWh
Dojezd:	190 km (dle NEDC*)	162 km	190 km
Maximální rychlost:	150 km/h	137 km/h	140 km/h
Váha:	1 195 kg	1 674 kg	1 542 kg
Oblast prodeje:	celosvětově, nejvíce Evropa a S. Amerika	USA, Kanada, Evropa	Německo, Evropa
Dostupný v ČR:	ano	ne	ano
Cena od:	---	---	35 000 euro
Cena od v Kč:	936 000 Kč	1 100 000,-	960 000,-

* nový evropský jízdní cyklus



Obr. 5 Nissan Leaf

Tabulka 4 Plnohodnotné automobily 2

	4.	5.	6.
Výrobce:	Nissan	Renault	Tesla Motors
Typ:	Nissan Leaf	Renault Zoe	Tesla Model S
Země výroby:	Japonsko	Francie	USA
Rok zahájení výroby:	2010, 2013 úprava	2012 seriová verze	2012
Vyrobena kusů (k datu):	150 000 (ke konci roku 2014)	12 600 (2Q 2014)	56 000 (12.2014)
Typ a počet motorů:	Jeden synchronní	Jeden synchronní	Jeden nebo dva asynchronní
Hnaná náprava:	Přední náprava	přední	Zadní nebo AWD
Výkon jmenovitý:	80 kW	65 kW	270 nebo 310 kW
Výkon špičkový:			
Kapacita baterie:	24 kWh	22 kWh	70 nebo 85 kWh
Dojezd:	175 km	210 km	440 nebo 500 km
Maximální rychlost:	150 km/h	135 km/h	200 km/h
Váha:	1 493 kg	1 468 kg	2 108 kg
Oblast prodeje:	USA, Evropa, Japonsko	Evropa	USA, Evropa
Dostupný v ČR:	ano	ne	ano
Cena od:	---	20 700 euro	97 550 euro
Cena od v Kč:	720 000,-	600 000,-	2 700 000,-

1.3.3 Sportovně užitkové vozy (SUV)



Obr. 6 BMW Brilliance Zinoro 1E

Tabulka 5 SUV

	1.	2.	3.
Výrobce:	BMW Brilliance	Kia Motors	Toyota + Tesla Motors
Typ:	Zinoro 1E	Kia Soul EV	Toyota RAV4 EV
Země výroby:	ČLR	Jižní Korea	USA
Rok zahájení výroby:	2014	2014	2012
Vyrobena kusů (k datu):	---	cca 5 000 (konec r. 2014)	3 600 (11.2014)
Typ a počet motorů:	jeden synchronní	jeden synchronní	Jeden asynchronní
Hnaná náprava:	zadní	přední	přední
Výkon jmenovitý:		81,4 kW	115 kW
Výkon špičkový:	125 kW	111 kW	
Kapacita baterie:	24 kWh	27 kWh	42 kWh
Dojezd:	150 km	212 km	182 km
Maximální rychlost:	130 km/h	145 km/h	160 km/h
Váha:	1 970 kg	1 513 kg	1 830 kg
Oblast prodeje:	ČLR	Evropa , Jižní Korea, USA	USA
Dostupný v ČR:	ne	ano	Ne
Cena od:	---	---	50 000 USD
Cena od v Kč:	1 550 000,-	849 980,-	1 180 000,-

1.3.4 Sportovní automobily



Obr. 7 Tesla Roadster

Tabulka 6 Sportovní automobily

	1.	2.	3.
Výrobce:	Tesla motors	Venturi	Lightning Car Comp.
Typ:	Tesla Roadster	Venturi Fetish	Lightning GT
Země výroby:	USA	Monako	Velká Británie
Rok zahájení výroby:	2008	2006	2014
Vyrobena kusů (k datu):	2 500	---	---
Typ a počet motorů:	Jeden asynchronní	Jeden synchronní	Dva synchronní
Hnaná náprava:	zadní	zadní	zadní
Výkon jmenovitý:			
Výkon špičkový:	185 nebo 215 kW	220 kW	2x 150 kW
Kapacita baterie:	53 kWh	54 kWh	44 kWh
Dojezd:	390 km	340 km	240 km
Maximální rychlost:	200 km/h	200 km/h	210 km/h
Váha:	1 235 kg	1 225 kg	1 850 kg
Oblast prodeje:	USA	Evropa	Velká Británie
Dostupný v ČR:	ne	ne	ne
Cena od:			
Cena od v Kč:	2 600 000,-	13 500 000,-	---

1.3.5 Lehká užitková vozidla



Obr. 8 Navistar eStar electric van

Tabulka 7 Lehká užitková vozidla

	1.	2.	3.
Výrobce:	Azure Dynamics/Ford	Renault	Navistar
Typ:	Azure Transit Connect Electric	Ranoult Kangoo Z.E.	Navistar eStar electric van
Země výroby:	Kanada	Francie	USA
Rok zahájení výroby:	2010	2011	2010
Vyrobena kusů (k datu):	500	16 000	---
Typ a počet motorů:	Jeden asynchronní	jeden synchronní	
Hnaná náprava:	Přední	Přední	zadní
Výkon jmenovitý:	52 kW	44 kW	70 kW
Výkon špičkový:	105 kW	---	---
Kapacita baterie:	28 kWh	22 kWh	80 kWh
Dojezd:	130 km	170 km	160 km
Maximální rychlost:	121 km/h	130 km/h	80 km/h
Váha:	1 791 kg	1 410 kg	2 500 kg
Oblast prodeje:	USA, Kanada, Norsko	Francie	USA
Dostupný v ČR:	ne	ne	ne
Cena od:			
Cena od v Kč:	1 360 000,-	830 000,-	3 600 000,-

2 Elektromobil pro modelování

Následující odstavce pojednávají o elektromobilu, který jsem si vybral pro modelování jízdních vlastností. Nejprve bude vůz představen s původními parametry, poté zmíním úpravy, jaké jsem provedl pro simulování.

2.1 Citroën Berlingo Electric

Pro modelování jsem si vybral francouzský bateriový elektrický vůz Citroën Berlingo Electric, protože je ve vlastnictví katedry. Tyto elektromobily byly vyráběny automobilkou Citroën, členem skupiny PSA Peugeot Citroën. Díky tomu tento vůz sdílí karoserii se sesterským Peugeotem Partner Electric. Vznikl modifikací původního Citroënu Berlingo se spalovacím motorem. Byl vyráběn v letech 2000 až 2002 a byl určen primárně pro francouzskou poštu pro rozvoz zásilek po městě. Dojezd tohoto vozu s původním akumulátorem a elektrovýzbrojí je 60 až 90 km, záleží na provozních podmínkách, hlavně tedy na rychlosti jízdy. Elektromobil má vestavěnou nabíječku a dva režimy dobíjení, standardní plné dobíetí ze zásuvky 230V/16A trvalo 9 hodin nebo rychlodobíjení ze speciálního stejnosměrného vysokonapětového zdroje, kterým lze dobít baterie na 80% kapacity a trvalo to 30 minut.^[3]

Standardně měl elektromobil baterii NiCd článků o celkové kapacitě 100 Ah, které byly sdruženy do 27 bloků o napětí 6 V. Jmenovité napětí celé baterie bylo tedy 162 V.^[3]

Elektromobil je poháněn stejnosměrným cize buzeným motorem o maximálním výkonu 28kW. Maximální rychlost je omezena řídicím počítačem na 95 kilometrů za hodinu. Zrychlení z 0 na 50 km/h trvá 8,4 s.^[3]

Hmotnost vozu včetně baterií, řidiče a příslušenství je 1550 kg.^[3]



Obr. 9 Citroën Berlingo Electric

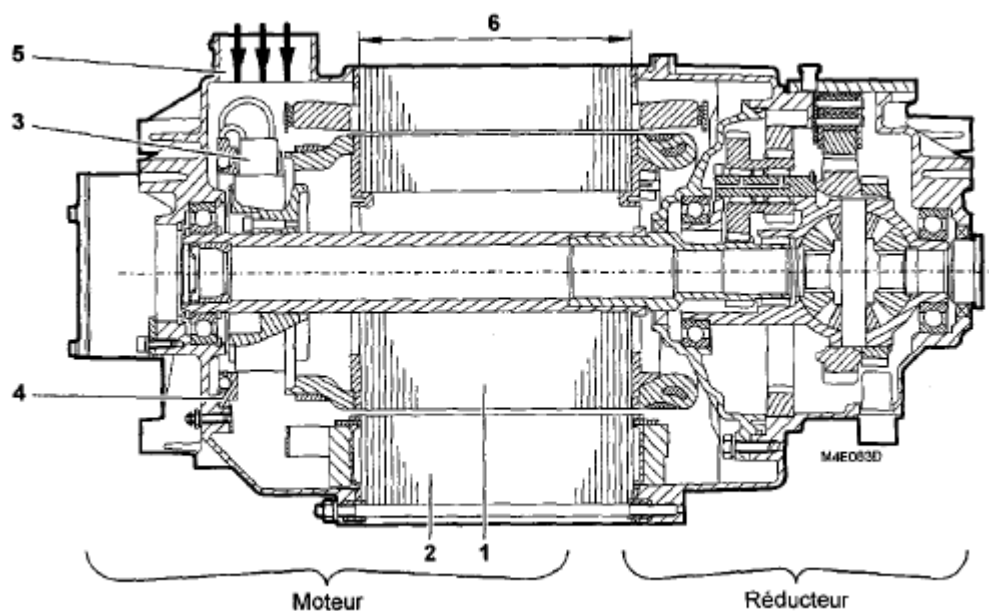
2.2 Motor

Elektromobil je vybaven stejnosměrným cize buzeným motorem. Pro omezení reakce kotvy je motor vybaven pomocnými (komutačními) póly. Jeho parametry jsou shrnuty v následující tabulce.^[3]

Tabulka 8 Parametry motoru

Výrobce	LEROY - SOMER
Typ	SA 18
Druh motoru	stejnosměrný cize buzený
Smysl otáčení	proti směru hodinových ručiček*
Jmenovitý výkon	15 kW
Maximální výkon	28 kW
Maximální moment	180 Nm
Maximální otáčky	6700 ot/min
Jmenovité napětí kotvy	162 V
Jmenovité napětí buzení	120 V
Jmenovitý proud kotvy	110 A
Maximální proud kotvy	200 A (max. 5 minut)
Maximální proud buzení	11 A
Počet pólů statoru	4 póly
Rozměry (d x š x v)	720 x 264 x 290 mm

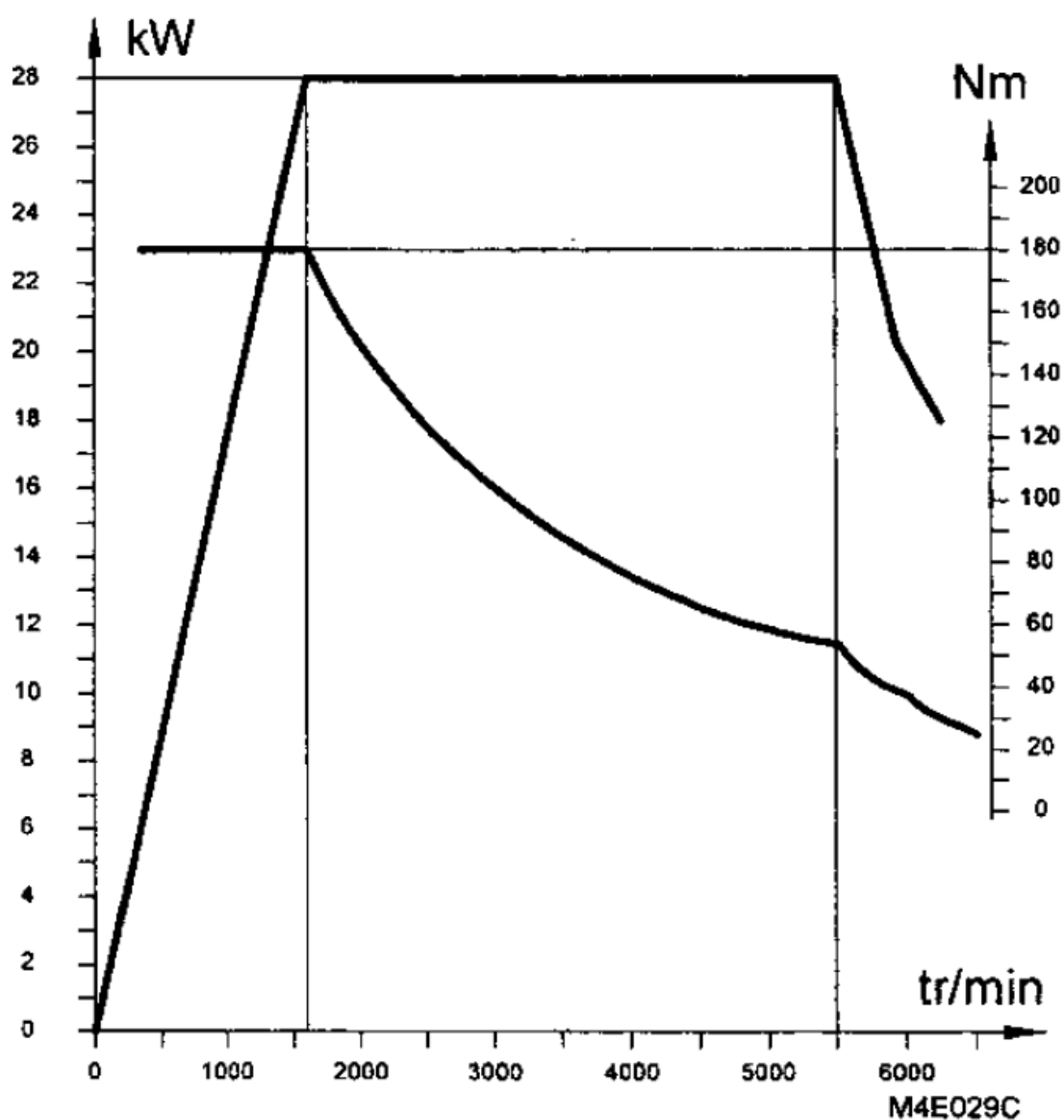
* - při pohledu ze strany komutátoru



Obr. 10 Řez trakčním motorem a reduktorem (převodovkou)

Motor je řízen tak, aby byl vždy dostupný maximální možný moment. Při rozjezdu je motor plně nabuzen, rozjezd probíhá pomocí zvyšování napětí na kotvě, přitom je moment konstantní a má hodnotu rovnou maximálnímu momentu. V okamžiku, kdy napětí na kotvě dosáhne napětí baterie, již nelze napětí více zvyšovat a je nutné přejít do režimu odbuzování, v té době má motor přibližně 1 650 ot/min a vůz jede rychlostí 25 km/h. Při odbuzování pracuje motor v režimu konstantního (maximálního) proudu a tedy i výkonu. Tento režim trvá až do 5 500 ot/min, což odpovídá rychlosti 95 km/h. V tuto chvíli začíná pracovat omezovač, který v případě překročení rychlosti maximální rychlosti 95 km/h začne omezovat kotevní proud.^[4]

Při zpomalování se postupuje podobným způsobem, ale opačně. Při zpomalování a brzdění rekuperační začne růst kotevní proud, až dosáhne hodnoty 75 A, pak začne s klesající rychlostí postupně přibuzování, aby motorem protékal stále stejný proud. Od rychlosti 25 km/h (otáček 1 650 ot/min) a méně je již motor opět plně nabuzen.^[4]

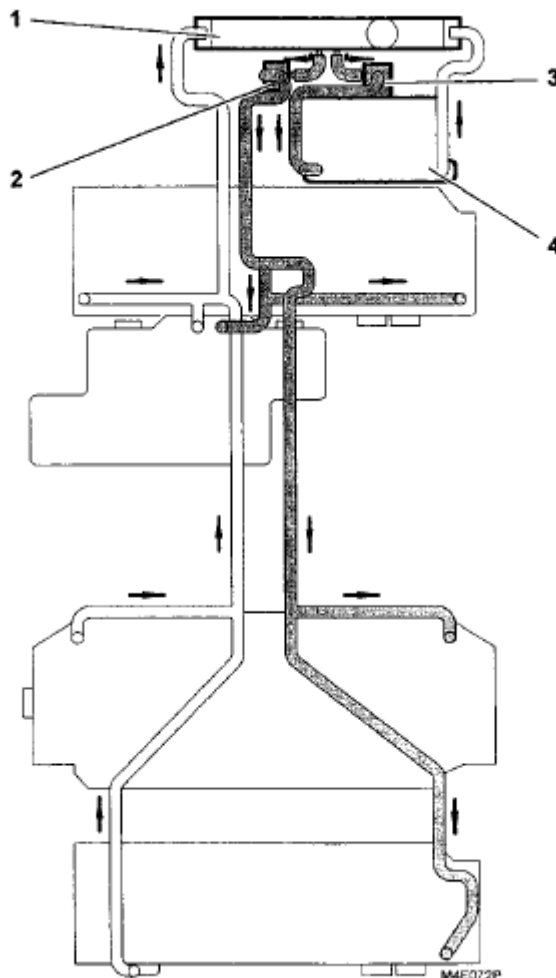


Obr. 11 Řídící charakteristika motoru (při konstantním momentu a výkonu)

2.3 Trakční akumulátor

Vozidlo bylo standardně vybaveno kapalinou chlazeným NiCd trakčním akumulátorem od výrobce SAFT typu STM 5100 o celkové kapacitě 100 Ah (12,5 kWh) a jmenovitém napětí 162 V. Skládá se z 27 bloků, každý o napětí 6 V. Každý blok se skládal z 5 NiCd článků zaplavených elektrolytem se jmenovitým napětím 1,2 V, pro lepší rozložení hmotnosti vozu a nízko položené těžiště bylo 17 bloků umístěno pod podlahou zavazadlového prostoru, z toho 11 mezi nápravami a 6 za zadní nápravou, a 10 bloků bylo umístěno v motorovém prostoru, z toho 6 v jeho dolní části a 4 v horní. [3]

Všech 27 bloků bylo propojeno pomocí hadic, kterými díky dvěma čerpadlům cirkulovala voda, a pokud se ohřála, byla chlazena chladičem v přední části vozu. Množství chladicí vody bylo nutné každých 10 000 km kontrolovat a v případě poklesu hladiny doplnit demineralizovanou nebo destilovanou vodou. Tak byl zajištěn odvod přebytečného tepla od baterií, které se při větších vybíjecích proudech zahřívají. [3]



Obr. 12 Schéma chlazení akumulátorů (1 - chladič, 2,3 - čerpadla, 4 - expanzní nádoba)

Jelikož se tento původní akumulátor nedochoval v provozuschopném stavu a pro budoucí využití jsou v plánu moderní lithiové akumulátory, tak jsem pro svůj model použil plánovanou verzi a elektromobil modeloval s lithiovou baterií o stejném jmenovitém napětí, jako původní NiCd baterie. Uvažovaná lithiová baterie je skládá ze tří řetězců, každý řetězec je složen ze 44 sériově spojených článků o jmenovité kapacitě 28 Ah. Parametry celé baterie tedy jsou 162,8 V, 84 Ah.

Zdrojem energie pro palubní síť, která napájí palubní počítač, světla, přístroje a ostatní elektroniku vozu, je standardní 12 V olověný autoakumulátor. Předepsaná kapacita je 70 Ah. Tento akumulátor je za provozu dobíjen z trakčního akumulátoru pomocí vestavěné nabíječky, je na něm udržováno nabíjecí napětí 14,1 V.^[3]

2.4 Další systémy

V této podkapitole popíšu další elektrické systémy, které se ve vozidle vyskytují.

2.4.1 Posilovač brzd

Posilovač brzd je zařízení, které snižuje sílu, kterou je nutné působit na brzdový pedál pro docílení stejného brzdného účinku, jako auta bez posilovače. Pro svou funkci potřebuje částečné vakuum, které je u aut se spalovacím motorem získáváno přímo ze sání do válců. Jelikož ale elektromobil žádný spalovací motor nemá, je nutné pro správnou funkci posilovače brzd vytvořit podtlak jinak.

Berlingo Electrique k výrobě částečného vakua využívá vakuovou vývěvu poháněnou elektromotorem o výkonu 100 W. Odčerpávat vzduch není nutné neustále, dostačuje pouze prvotní odčerpání vzduchu po zapnutí a poté hrazení ztrát podtlaku netěsnostmi systému a při brzdění. U tohoto elektromobilu vývěva při běžném provozu spíná přibližně jednou za minutu na dobu asi deset vteřin.^[3]

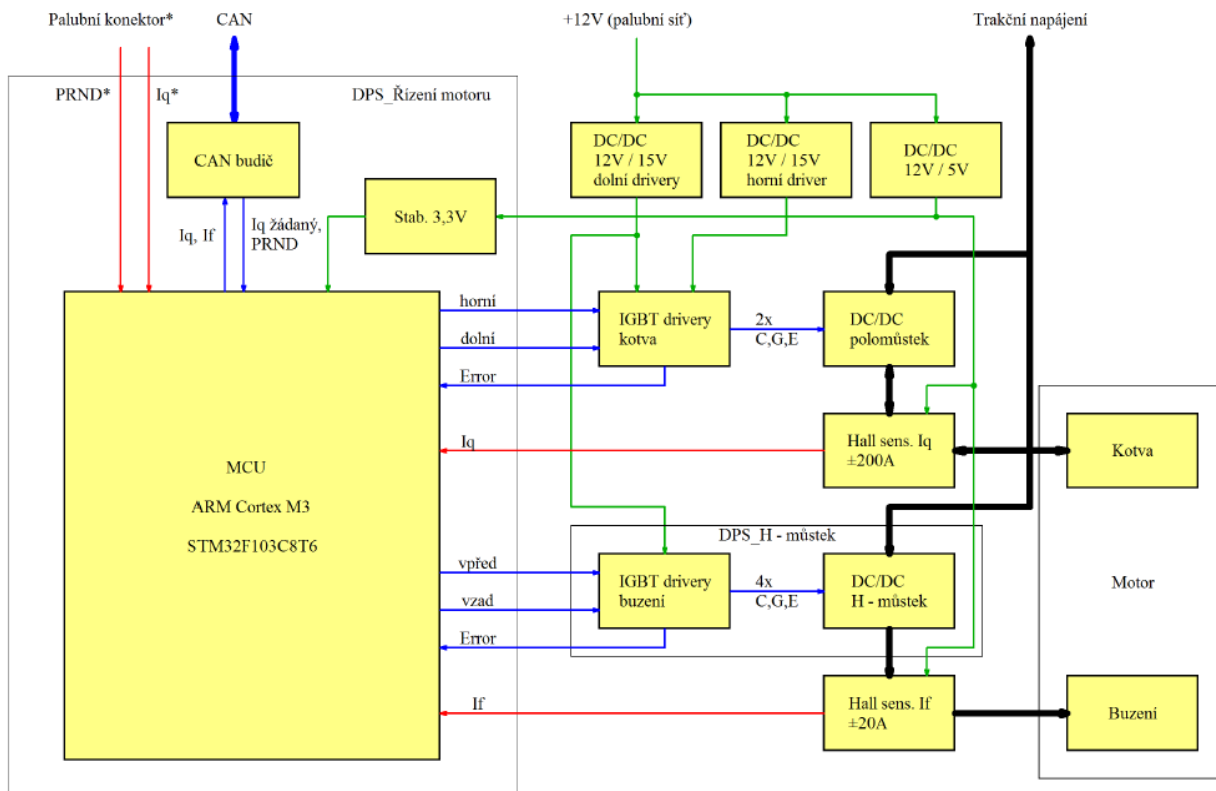
2.4.2 Ostatní

Mezi další elektrické systémy patří například světla nebo topení. Topení je z důvodu šetření elektrické energie akumulátorů benzínové, ale jeho ovládání je elektrické a teplý vzduch z výměníku tepla vhání do interiéru vozu elektrický ventilátor. Dalším elektrickým spotřebičem je elektromechanický posilovač řízení, který má příkon až 600 W.^[3]

2.5 Měniče

V následujících odstavcích bude představena měničová výbava vozidla. Jedná se o měnič kotvy a měnič buzení.

Na následujícím obrázku je blokové schéma řízení a měničů od Pavla Skarolka, který souběžně pracuje na návrhu a realizaci modulu řízení motoru.



Obr. 13 Blokové schéma řízení a měničů

2.5.1 Měnič kotvy

Měnič kotevního napětí je řízený nadřazeným počítačem a jeho úkolem je udržovat obvodem kotvy takový proud, jaký žádá řídicí počítač. Fyzicky je realizovaný pomocí dvou prvků IGBT. Návrhem a výrobou řídicího počítače a měniče kotvy se zabývá můj kolega Pavel Skarolek.

2.5.2 Měnič buzení

Měnič budícího obvodu je součástí měniče kotvy a je též řízený hlavním řídicím počítačem vozidla. Jeho úkolem je držet hodnotu i směr proudu, jaké žádá řídicí počítač. Z důvodu požadavku na reverzaci budícího proudu je tvořen plným H můstkem složeným z prvků IGBT. Návrhem a výrobou se zabývá opět Pavel Skarolek.

2.6 Další parametry vozu pro simulaci

Pro úspěšnou simulaci modelu vozidla je nutné znát i jeho další parametry, jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 9 Další parametry pro simulaci

Mechanické parametry

Koeficient odporu vzduchu c_d [-]	0,4
Čelní plocha vozu A [m ²]	2,66
Koeficient valivého tření u_{rr} [m]	0,004
Převod z motoru na nápravu G [-]	7,18
Účinnost převodovky η_{tr} [-]	0,97
Poloměr kola r [m] (165/70 R14)	0,2933

Elektrické parametry

Indukčnost kotvy L_a [H]	0,0001
Odpor kotvy R_a [Ω]	0,1
Indukčnost buzení L_b [H]	4
Odpor buzení R_b [Ω]	11
Účinnost měniče η_m [-]	0,98

Parametry BMS

Jmenovité napětí článku U_{el} [V]	3,7
Jmenovitá kapacita článku C_{el} [Ah]	28
Počet článků v sérii [-]	44
Počet paralelních větví [-]	3

Další parametry okolí ^[24]

Hustota vzduchu ρ [kg.m ⁻³]	1,25
Tíhové zrychlení g [m.s ⁻²]	9,81

3 Prostředí pro modelování jízdních vlastností

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé bloky a subsystemy z prostředí pro modelování jízdních vlastností elektromobilu. Prostředí je vytvářeno modulárně takovým způsobem, aby se v případě potřeby dalo využít k modelování jiných elektromobilů a aby šlo výsledky simulací snadno porovnat.

Model byl vytvořen v matematickém softwaru MATLAB Simulink od firmy MathWorks, verze 2014b. Na následujícím obrázku je pro přehlednost vyobrazený kompletní model. Ve větším rozlišení je pak také v příloze.

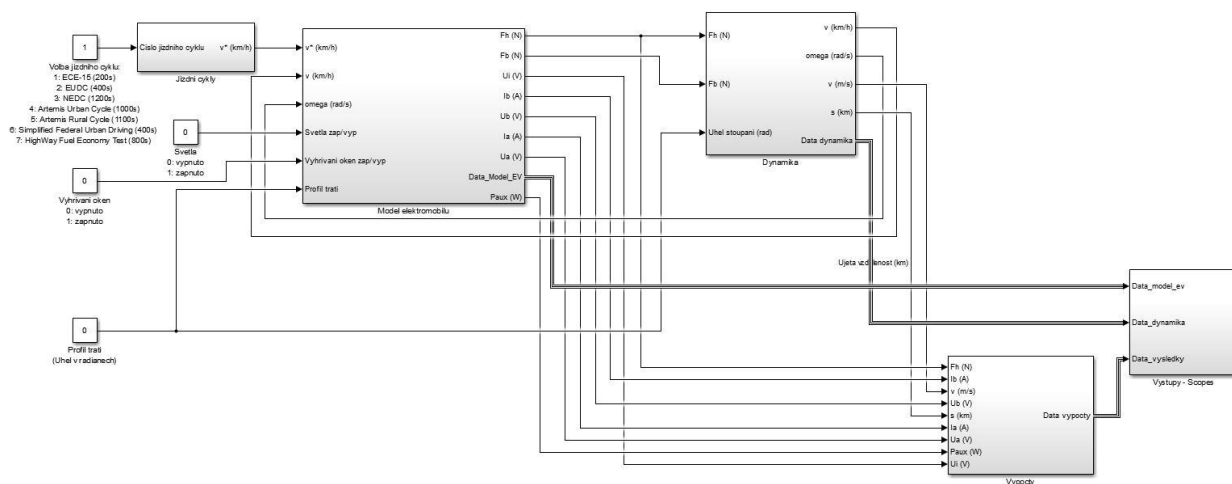
Vstupy do prostředí se nacházejí na levém okraji modelu. Jedná se například o zadaný jízdní cyklus. Menší blok v levé horní části nese název Jízdní cykly a obsahuje průběhy sedmi nejpoužívanějších jízdních cyklů vhodných pro elektromobil. Z důvodu omezení maximální rychlosti elektromobilu na 95 km/h byly z výběru vyřazeny dálniční jízdní cykly, ve kterých by žádaná rychlost po větší část doby jízdy přesahovala rychlost maximální.

Blok uprostřed reprezentuje samotný elektromobil a zahrnuje subsystemy regulátoru rychlosti (virtuální řidič), přepočtu žádané rychlosti na žádaný moment, regulátory budícího a kotevního proudu, model motoru a převodovky, model brzdy, model akumulátoru a výpočet spotřeby pomocných spotřebičů (posilovač brzd, světla).

Napravo od modelu elektromobilu se nachází blok Dynamika, do něj vstupuje tažná síla vozu, brzdná síla a jízdní odpory a vypočítávají se dynamické parametry vozidla jako okamžitá rychlost, zrychlení, dynamická síla, otáčky motoru nebo ujetá vzdálenost.

Blok v pravé dolní části se nazývá Výpočty a probíhají v něm, jak už je z jeho názvu patrné, výpočty elektrických a mechanických veličin, jako výkony, příkony, spotřeby energie nebo účinnosti.

Zbývajícím blokem, umístěným na pravém okraji, je blok Výstupy. Do něj jsou přivedena všechna naměřená i vypočítaná data a z nich jsou sestaveny výsledky simulací.

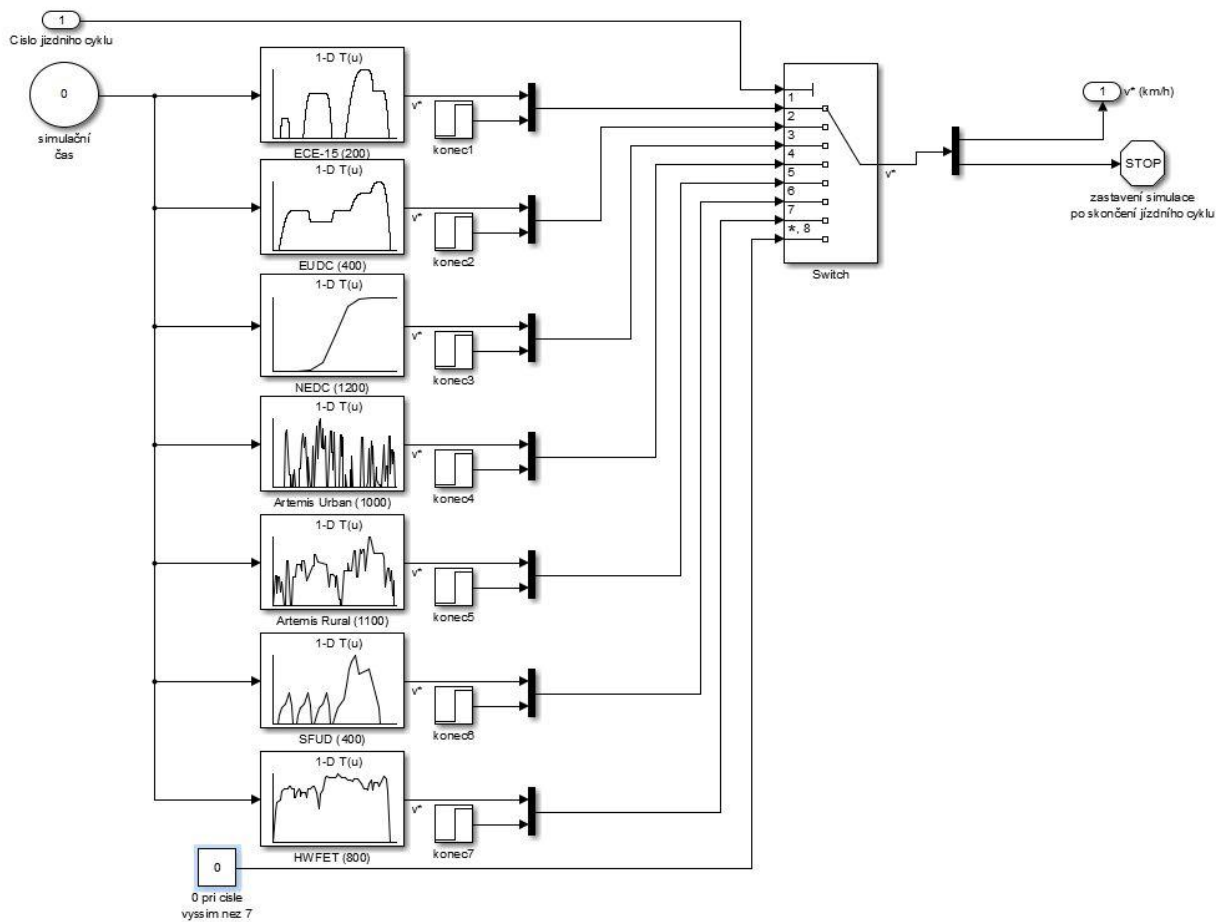


Obr. 14 Model v Simulinku

3.1 Jízdní cykly

V následujících kapitolách představím jízdní cykly, na kterých jsem model elektromobilu Citroën Berlingo Electricque testoval. Maximální rychlost vozu je omezena na 95 km/h [3], proto se bude jednat hlavně o městské a venkovské jízdní cykly, nikoli dálniční. To také odpovídá zaměření automobilu, který je stavěný především na městský provoz.

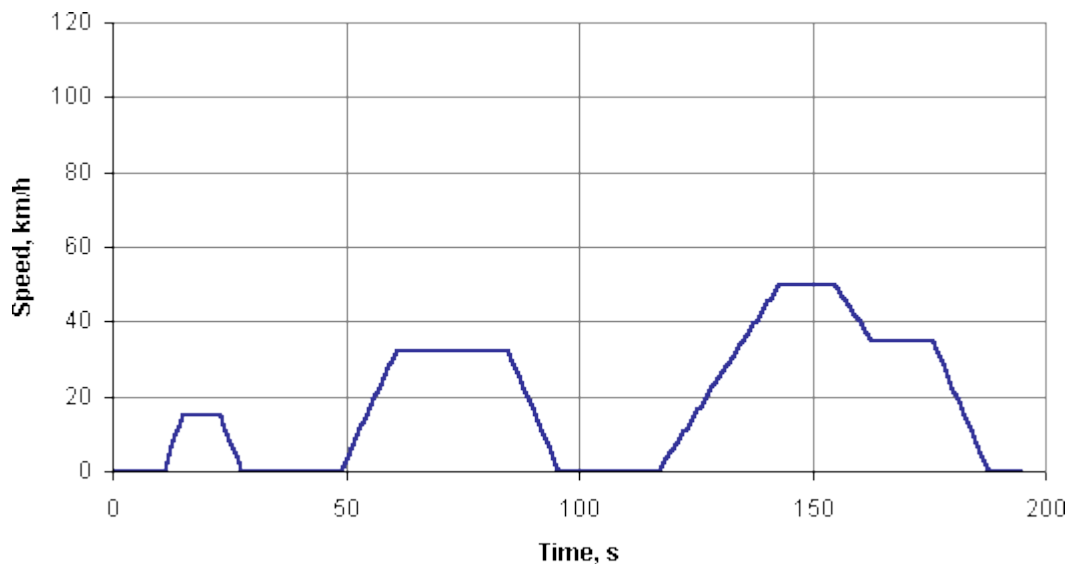
Všechny cykly jsou zadané pomocí tabulky, výběr jízdního cyklu je řešení pomocí přepínače, jehož vstupem je číslo jízdního cyklu. Zároveň se přepíná i konečný čas simulace, pokud je čas simulace v prostředí Simulink delší než je délka cyklu, simulace se po ukončení daného cyklu automaticky zastaví. Výstupem jízdního cyklu je žádaná rychlost v^* [km/h], jakou by se měl elektromobil pohybovat.



Obr. 15 Blok jízdních cyklů

3.1.1 UDC (ECE-15)

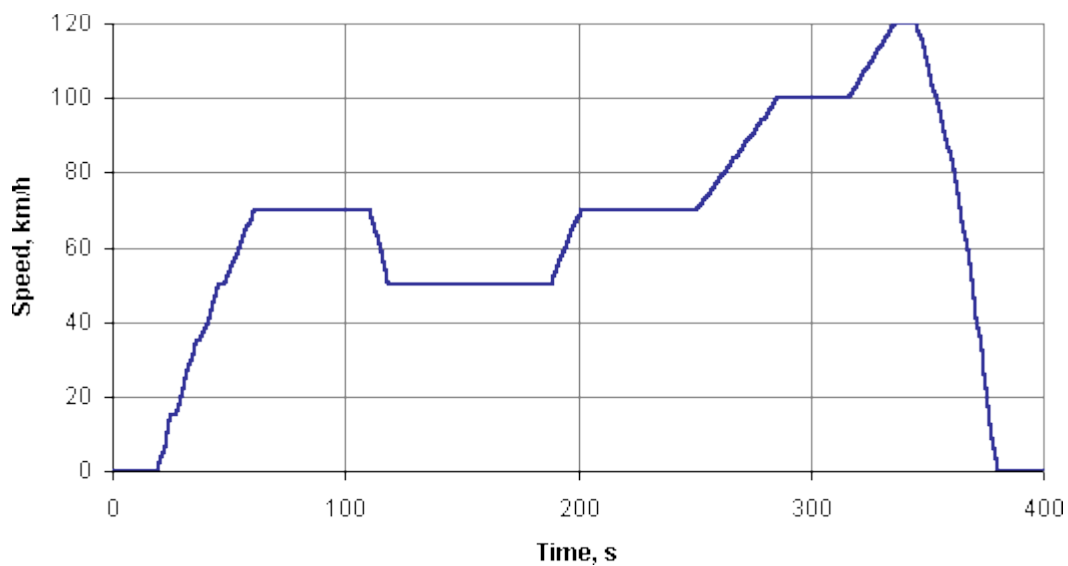
Jedná se o městský cyklus používaný pro testy spotřeby paliva a emisí v Evropské Unii. Maximální rychlost v tomto cyklu je 50 km/h. Během tohoto cyklu vůz ujede 1,3 km, přitom přibližně 20% času stojí. Cyklus trvá 200 sekund, průměrná rychlost je 22,5 km/h. [29]



Obr. 16 Jízdní cyklus UDC (ECE-15)

3.1.2 EUDC

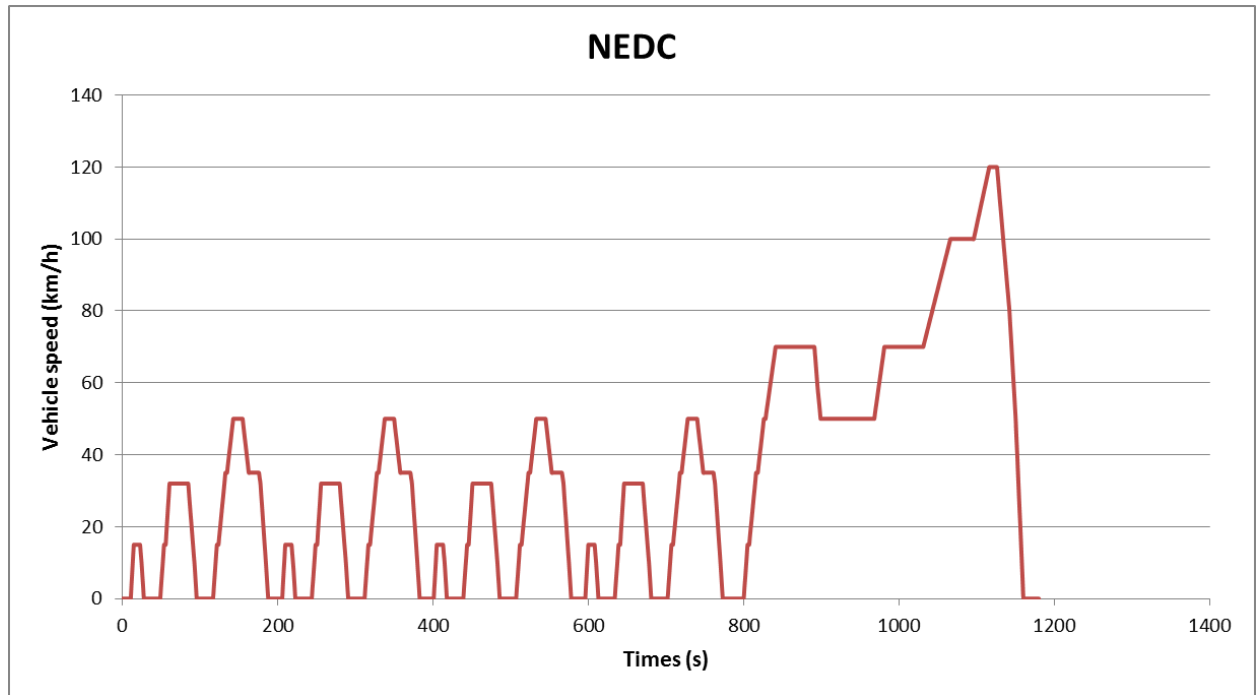
Tento cyklus se nazývá rozšířený městský jízdní cyklus, je také původem z Evropské Unie. V tomto cyklu dosáhne vozidlo maximální rychlosti 120 km/h a ujede 7,4 km. Průměrná rychlost je 66 km/h, cyklus trvá 400 sekund, 90% z této doby stráví vozidlo v pohybu. [29]



Obr. 17 Jízdní cyklus EUDC

3.1.3 NEDC

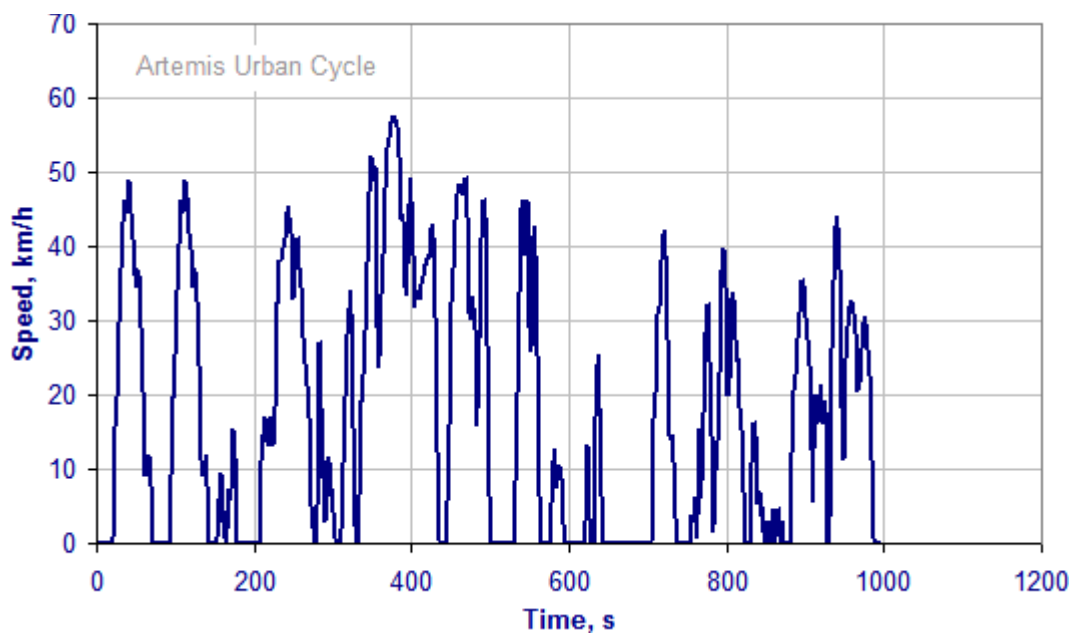
Jízdní cyklus New European Driving Cycle (Nový Evropský Jízdní cyklus) se skládá ze čtyř opakování cyklu UDC a po něm následuje jeden cyklus EUDC. Maximální rychlost je tedy stejná jako u předchozího cyklu EUDC, celková doba činí 1200 sekund. Automobil ujede 11,8 km s průměrnou rychlostí 35,5 km/h. [29]



Obr. 18 Jízdní cyklus NEDC

3.1.4 Artemis Urban Cycle

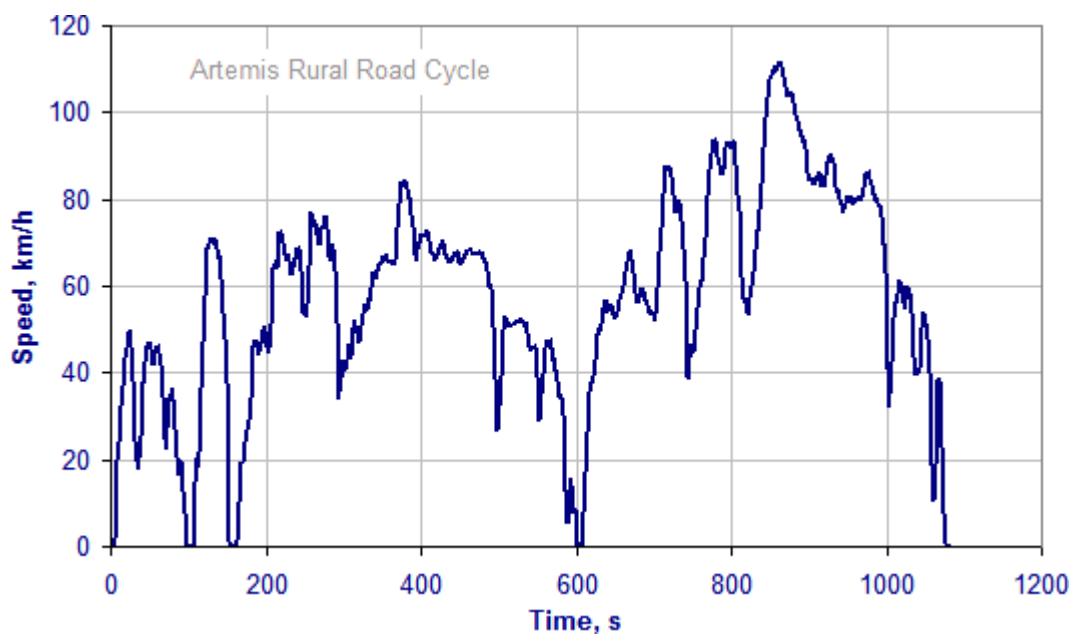
Jízdní cykly projektu ARTEMIS vznikly díky 40 laboratořím z celé Evropy a jsou snahou o vylepšení evropského jízdního cyklu. Tyto cykly byly vytvořeny statisticky z měření rychlosti reálné dopravy v několika evropských městech. Maximální rychlost městské verze cyklu je 58 km/h. Cyklus trvá 1000 sekund, z nichž rovnou třetinu vůz stojí, díky tomu je průměrná rychlost jen necelých 16 km/h. Celková dráha cyklu činí 4,4 km. [30]



Obr. 19 Jízdní cyklus Artemis Urban

3.1.5 Artemis Rural Cycle

Druhý z jízdních cyklů projektu ARTEMIS, tentokrát mimoměstská varianta. Mimoměstský cyklus trvá 1100 sekund, z nichž 95% času je auto v pohybu. Maximální rychlost je 110 km/h, průměrná 55,6 km/h. Ujetá dráha je 17 km.^[30]



Obr. 20 Mimoměstský jízdní cyklus Artemis Rural

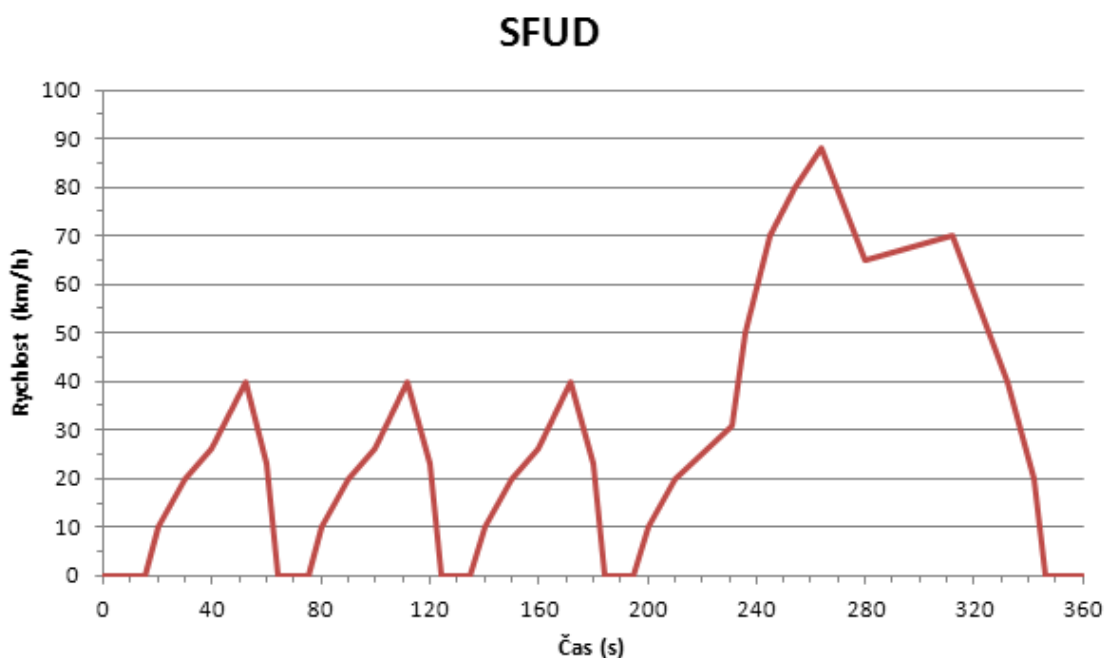
3.1.6 Artemis Highway Cycle

Projekt ARTEMIS zahrnuje i dálniční cyklus, ale vzhledem k tomu, že obsahuje nezanedbatelný podíl rychlostí přes 100 km/h a maximální rychlost zkoušeného elektromobilu je 95 km/h, nemá smysl takový cyklus absolvovat. [30]

3.1.7 SFUD

SFUD je jeden ze dvou amerických jízdnicích cyklů, které jsem zahrnul do simulace. Tento cyklus je průběhem i dobou trvání podobný evropskému městskému (UDC), liší se o něco vyšší maximální rychlostí, která činí 88 km/h. Cyklus trvá 360 sekund, z toho 60 sekund se vůz nehýbe. Průměrná rychlost je 31 km/h a celková dráha 3,1 km. [22]

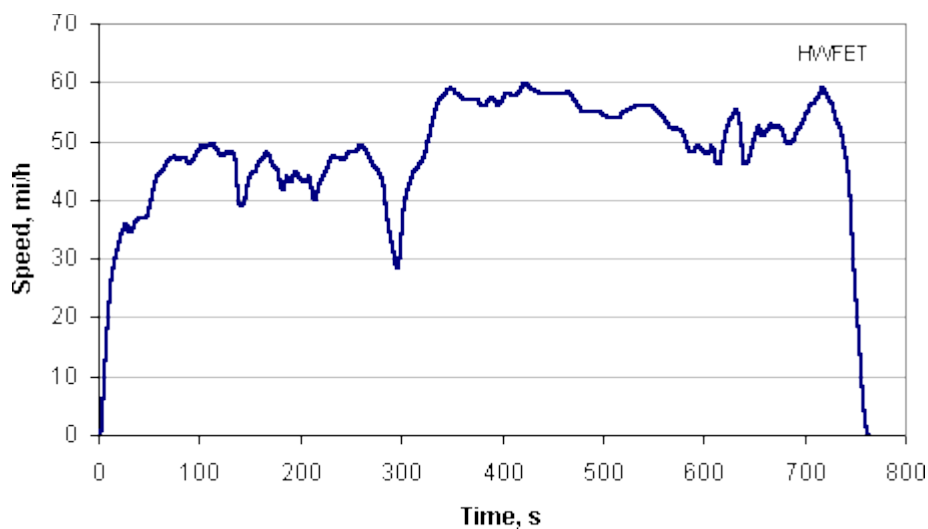
Americké cykly jsou samozřejmě zadány v mílích za hodinu, pro potřeby modelu jsem je přepočítal na kilometry za hodinu.



Obr. 21 Jízdnicí cyklus SFUD

3.1.8 HWFET

Posledním jízdnicím cyklem z mého výběru a druhým americkým cyklem je HWFET – Highway Fuel Economy Test. Tento cyklus jako jediný s délkou přes 500s neobsahuje zastávky, vůz se na začátku rozjede a zastaví až na konci. Z celkových 800 sekund stráví vůz v pohybu 94% času. Během cyklu ujede testovaný automobil 16,5 km s průměrnou rychlostí 74,5 km/h. Maximální rychlost je 97 km/h. [31]



Obr. 22 Jízdní cyklus HWFET

3.1.9 Porovnání jízdních cyklů

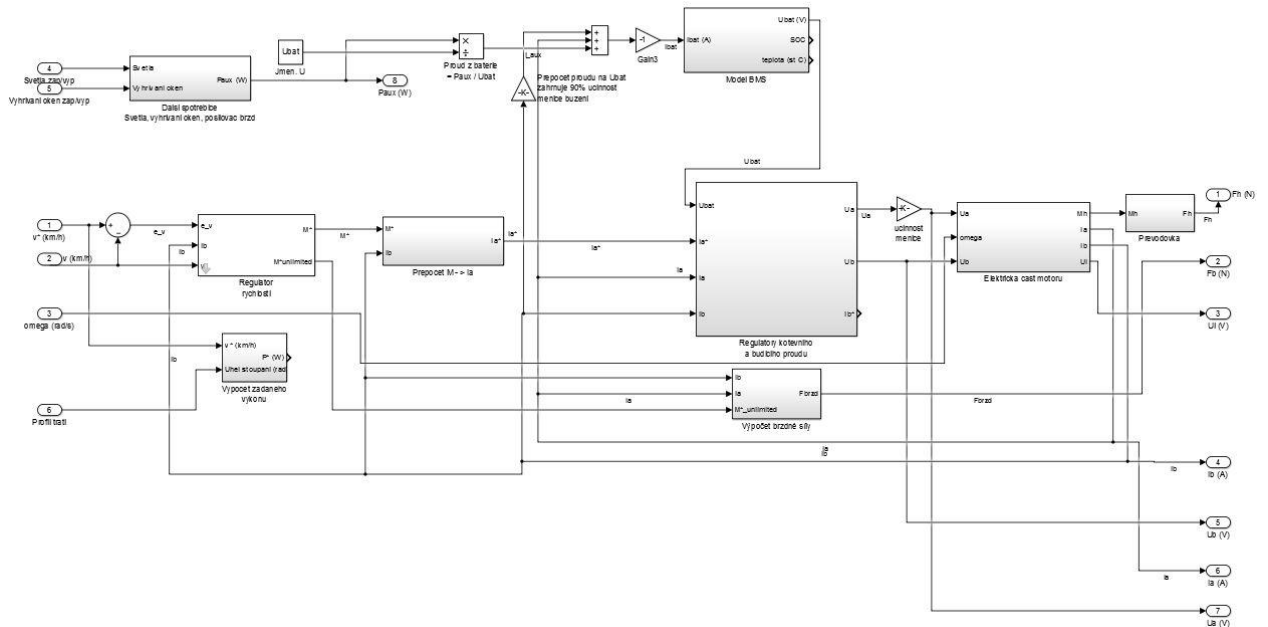
V následující tabulce lze porovnat jednotlivé parametry jízdních cyklů, jako doba trvání, ujetá vzdálenost, doba stání, maximální a průměrná rychlost.

Tabulka 10 Porovnání jízdních cyklů

	Doba trvání (s)	Ujetá vzdálenost (km)	Doba stání (s)	Doba stání (%)	Maximální rychlost (km/h)	Průměrná rychlost (km/h)
UDC	200	1,26	38	19%	50	22,68
EUDC	400	7,35	40	10%	120	66,15
NEDC	1200	11,83	192	16%	120	35,49
Artemis Urban	1000	4,41	334	33%	58	15,88
Artemis Rural	1100	16,99	55	5%	110	55,60
SFUD	360	3,09	62	17%	88	30,90
HWFET	800	16,55	44	6%	97	74,48

3.2 Model elektromobilu

V následujících kapitolách se zaměřím na blok modelu simulovaného elektromobilu. Vymenuji všechny subsystémy a popíšu, co a jakým způsobem se v nich počítá. Na následujícím obrázku je celý model elektromobilu, jednotlivé části popíšu dále.



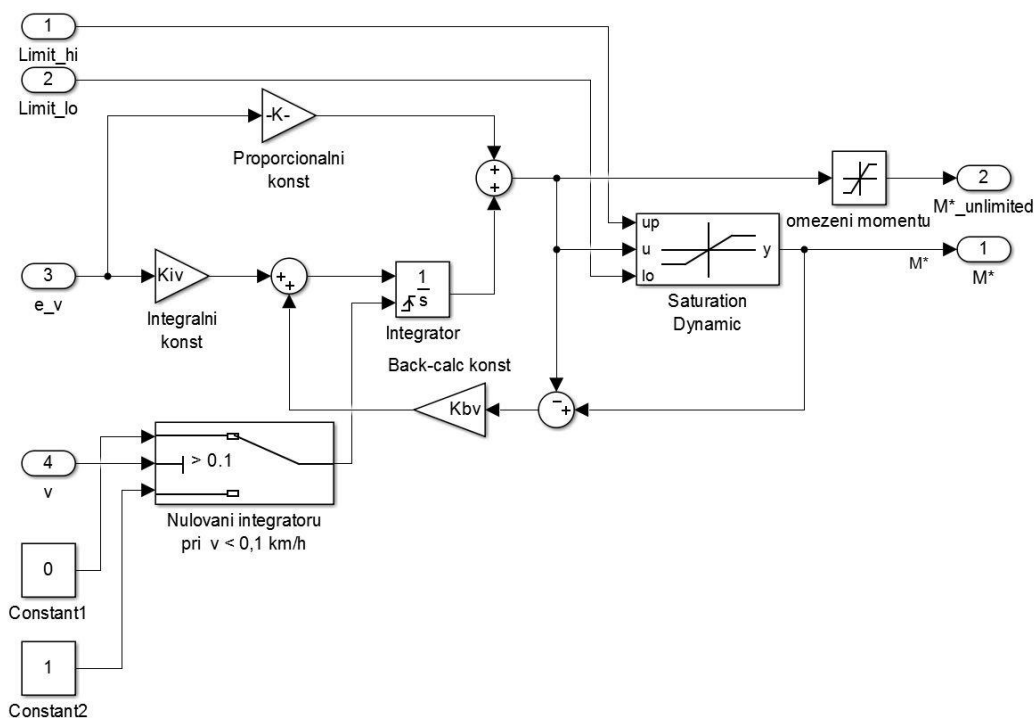
Obr. 23 Model elektromobilu

3.2.1 Regulátory rychlosti a momentu

V následujících kapitolách bude představen postup výpočtu žádaného momentu a blok regulátoru rychlosti.

3.2.1.1 Regulátor rychlosti a výpočet žádaného momentu

Úkolem regulátoru rychlosti je, jak název napovídá, udržovat žádanou rychlost, nebo se jí alespoň snažit co nejvíce přiblížit. Jedná se o PS regulátor s anti-wind-up zapojením řešeným pomocí back-calculation. Vstupem regulátoru je regulační odchylka rychlosti, akční veličinou je pak žádaný moment. Maximální žádaný moment je nutné omezit, protože v případě velké regulační odchylky by dosáhl nesmyslně vysokých hodnot.^[2] Dále je nutné pro rychlou reakci regulátoru vynulovat integrátor při malé regulační odchylce.



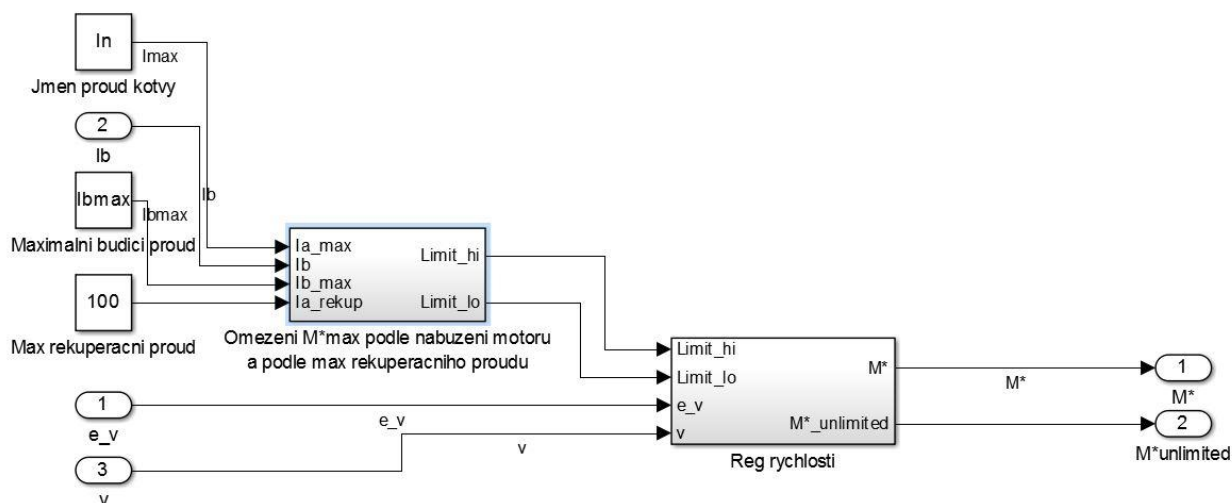
Obr. 24 Blokové schéma regulátoru rychlosti

Maximální kladný (urychlující) moment, který může motor bezpečně dodávat, je omezený maximálním proudem kotvy, maximální záporný moment (rekuperační) je omezený maximálním povoleným rekuperačním proudem kotvy, který může být menší nebo rovný maximálnímu proudu kotvy. Oba momenty jsou ještě omezeny podle aktuálního nabuzení motoru, protože s klesajícím budícím proudem klesá i moment motoru. Všechny výpočty omezení byly prováděny na základě upravené momentové rovnice: [1]

$$M = k_m * \Phi * I_a \text{ [Nm]} \quad (3.1)$$

$$\Phi = k_\phi * I_b \text{ [Wb]} \quad (3.2)$$

kde k_m [-] je motorová konstanta, Φ [Wb] je magnetický tok, I_a [A] kotevní proud, k_ϕ [Wb.A⁻¹] je konstanta magnetického toku a I_b [A] kotevní proud.

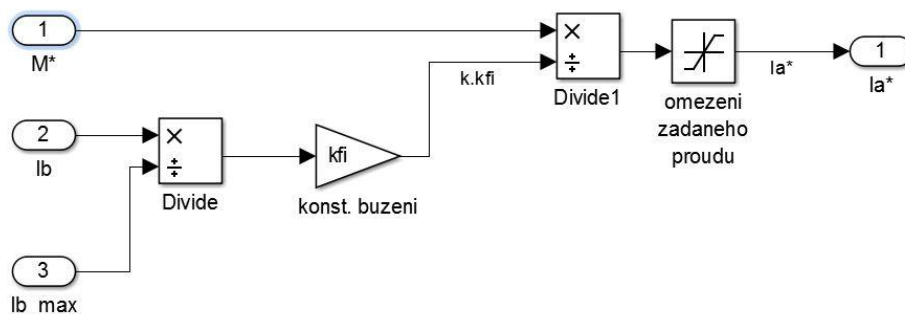


Obr. 25 Regulátor rychlosti

3.2.1.2 Přepočítání žádaného momentu na žádaný proud

Vstupní veličinou pro motor je žádaný proud, proto je nutné přepočítat žádaný moment na žádaný proud. To se provede pomocí vhodné úpravy předcházející momentové rovnice na tvar:

$$I_a^* = \frac{M^*}{k_\phi * k_m * I_b} [A] \quad (3.3)$$



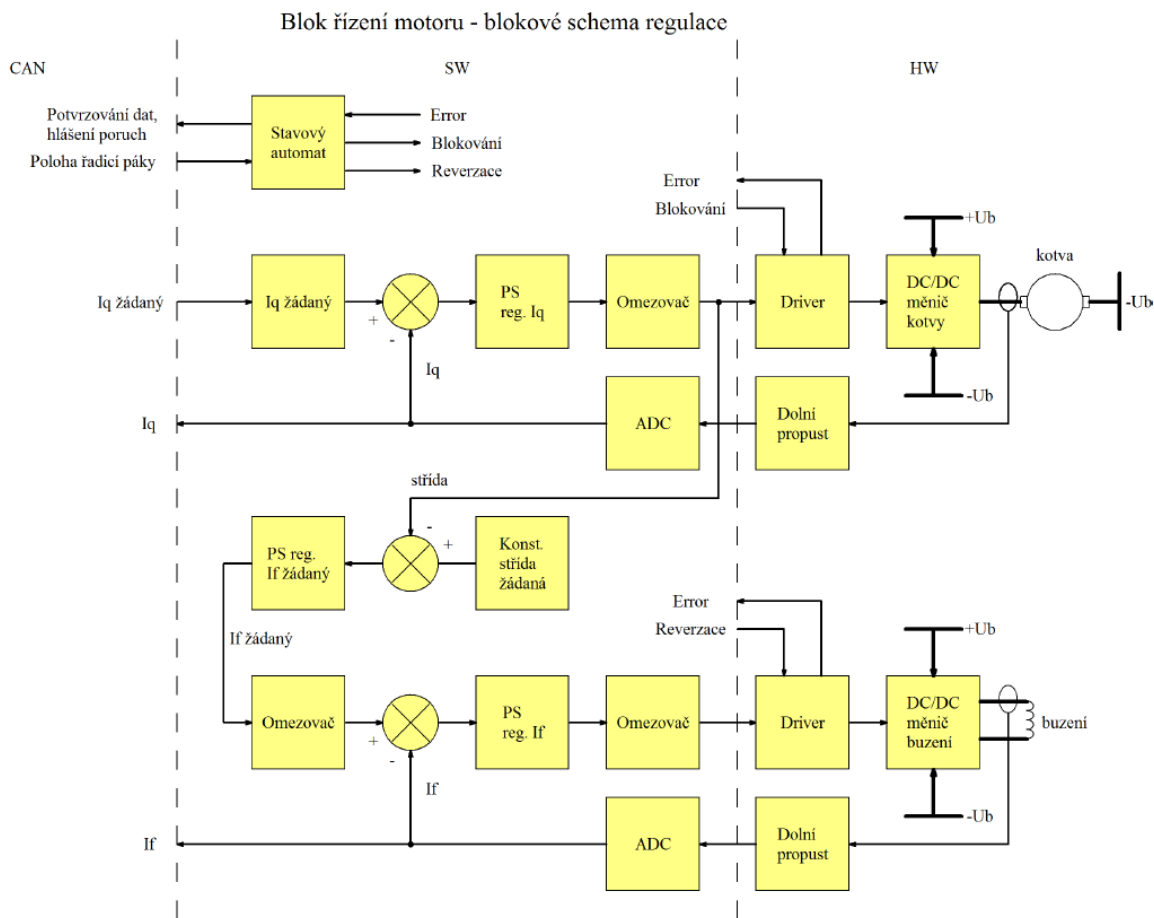
Obr. 26 Blok přepočtu žádaného momentu na proud

3.2.2 Regulátory kotevního a budícího proudu

Tyto regulátory mají za úkol přímo regulovat napětí a proudy kotevního a budícího obvodu. Všechny tyto regulátory jsou typu PS s anti wind-up zapojením.

Odchylka žádaného a skutečného proudu kotvy vstupuje do prvního regulátoru, kterým je regulátor kotevního proudu. Na jeho výstupu je kotevní napětí, přiváděné pomocí měniče na svorky kotvy. Regulační odchylka napětí kotvy a napětí baterie vstupuje do druhého regulátoru žádaného budícího proudu. Tento regulátor má za úkol zjistit, kdy začít odbuzovat, což se stane v okamžiku, kdy napětí na kotvě dosáhne rovnosti s napětím na baterii a žádaný proud už by tak nešlo udržet. V tomto okamžiku zareaguje regulátor žádaného budícího proudu, jehož výstupem je právě žádaný budící proud. Ten poté vstupuje do třetího regulátoru, kterým je regulátor skutečného proudu. Ten funguje velmi podobně jako regulátor kotevního proudu, podle rozdílu (odchylky) žádaného a skutečného budícího proudu ovládá budící napětí.

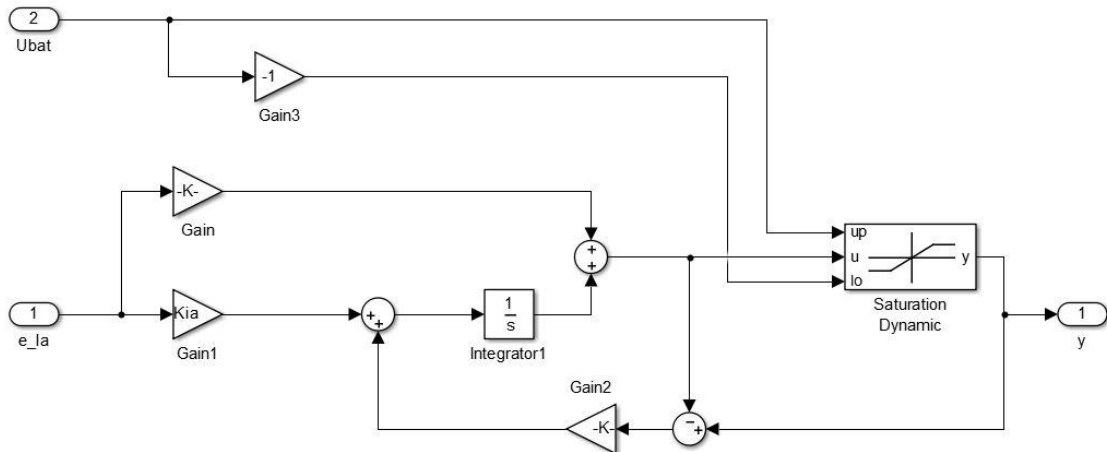
Následující blokové schéma regulátorů kotevního a budícího proudu je od Pavla Skarolka, který souběžně pracuje na návrhu a realizaci modulu řízení motoru.



Obr. 27 Blokové schéma regulátorů kotevního a budícího proudu

3.2.2.1 Regulátor kotevního proudu

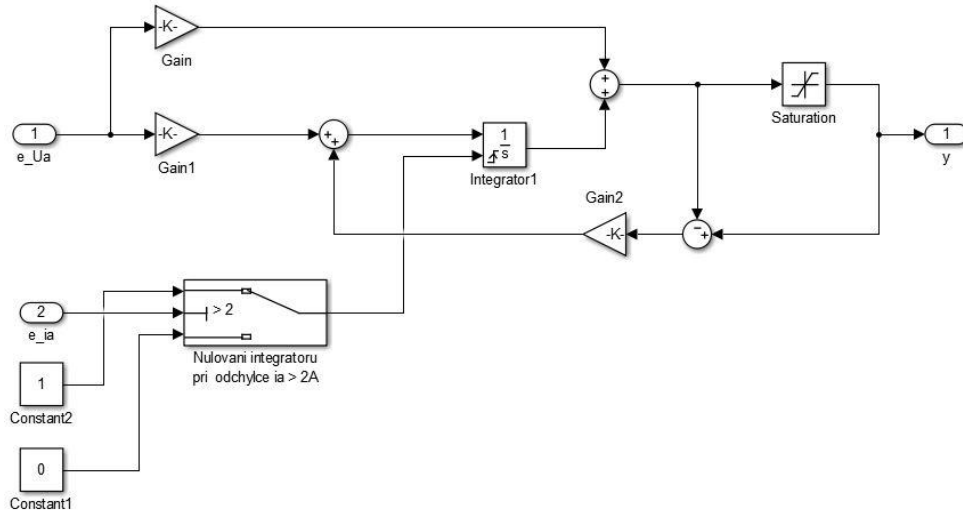
Regulátor kotevního proudu je klasický PS regulátor s anti wind-up zapojením. Výsledná hodnota napětí, kterou může pouštět na svorky kotvy, je dynamicky omezena podle aktuálního napětí na baterii. Napětí může být pouze kladné, protože poloviční můstek neumožňuje připojit opačnou polaritu na zátěž.



Obr. 28 PS regulátor kotevního proudu

3.2.2.2 Regulátor žádaného budícího proudu

Regulátor žádaného budícího proudu je opět PS regulátor s anti wind-up zapojením, pro správnou funkci u něj ale bylo nutné zavést resetování integrátoru v případě, že regulační odchylka mezi skutečným a žádaným kotevním proudem přesáhne 2 A. Bez tohoto resetování se stávalo, že se integrátor zasekával, přestal regulovat žádaný budící proud a motor se přestal odbuzovat.



Obr. 29 Regulátor žádaného budícího proudu

3.2.2.3 Regulátor budícího proudu

Tento regulátor má na vstupu regulační odchylku budícího proudu a je úplně stejně zapojený jako regulátor kotevního proudu, jediným rozdílem je omezení výstupního napětí. To je nastaveno na 120 V, což je maximální hodnota napětí měniče buzení.

3.2.3 Motor a převodovka

3.2.3.1 Model obvodu kotvy

Model motoru vychází ze základních obvodových rovnic stejnosměrného cize buzeného motoru. [1]

$$U_a = R_a * i_a + L_a * \frac{di_a}{dt} + U_i \quad (3.4)$$

$$U_i = k_m * k_\phi * i_b * \omega \quad (3.5)$$

$$M_h = k_m * k_\phi * i_b * i_a \quad (3.6)$$

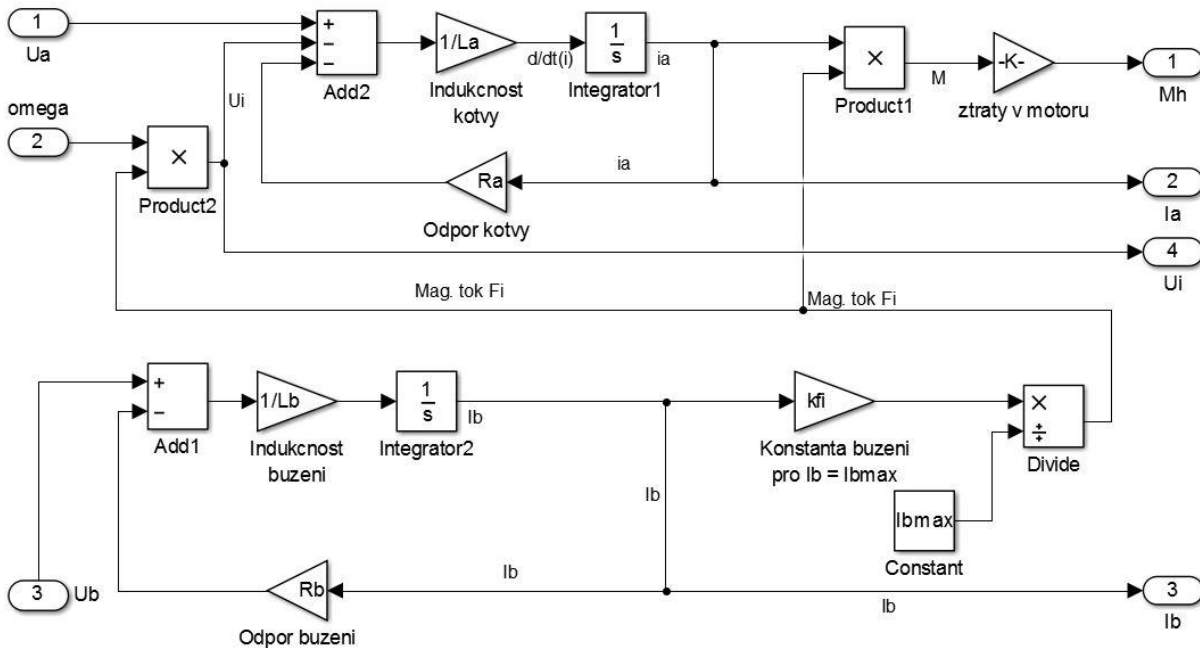
Vstupy jsou napětí kotvy U_a [V], úhlová rychlost rotoru ω [rad.s⁻¹] a magnetický tok ze statoru ϕ [Wb], model pak vypočítá proud kotvy I_a [A], hnací moment M_h [N] a indukované napětí U_i [V].

3.2.3.2 Model obvodu buzení

Model obvodu buzení vychází z obvodové rovnice budícího obvodu.^[1] Magnetický tok Φ [Wb] procházející rotorem se určí ze součinu budícího proudu i_b [A] a konstanty k_ϕ [Wb.A⁻¹]:

$$U_b = R_b * i_b + L_b * \frac{di_b}{dt} \quad (3.7)$$

$$\Phi = k_\phi * i_b \quad (3.8)$$



Obr. 30 Model kotevního a budícího obvodu

3.2.3.3 Převodovka

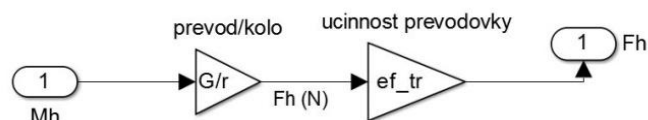
Elektromobil nemá převodovku, jak ji známe z aut se spalovacím motorem, ale má pouze jeden stálý převod. Převodovku tedy tvoří jen převod z hřídele motoru na diferenciál a má-li být výstupem tohoto bloku síla působící na kolo, pak je nutné sem ještě započítat účinný poloměr kola.^[4]

Převod z motoru na nápravu činí $G = 7,18$ ^[3]. Poloměr kola r [m] vypočítáme z rozměrů obuté pneumatiky, který je ve známém normovaném formátu $xxx/yy Rzz$, kde xxx vyjadřuje šířku běhounu pneumatiky v milimetrech, yy je procentuální vyjádření poměru, kolik procent z šířky běhounu je výška pneumatiky (tzn. šířka mezikružjí mezi ráfkem a vnějším obvodem pneumatiky) a zz vyjadřuje průměr ráfku v palcích. Citroën Berlingo Electricque využívá pneumatiky s nízkým valivým odporem rozměru $165/70 R14$ ^[3], poloměr kola tedy bude:

$$r = \frac{ZZ * 25,4 + \frac{YY}{100} * XXX * 2}{2} = \frac{14 * 25,4 + \frac{70}{100} * 165 * 2}{2} = 293,3 \text{ mm} = 0,2933 \text{ m}$$

Dále je ještě nutno započítat účinnost převodovky η_{tr} [-] která je 0,97. Přepočet hnacího momentu M_h [Nm] na hnací sílu na kolech F_h [N] tedy bude:

$$F_h = M_h * \frac{G}{r} * \eta_{tr} [N] \quad (3.9)$$

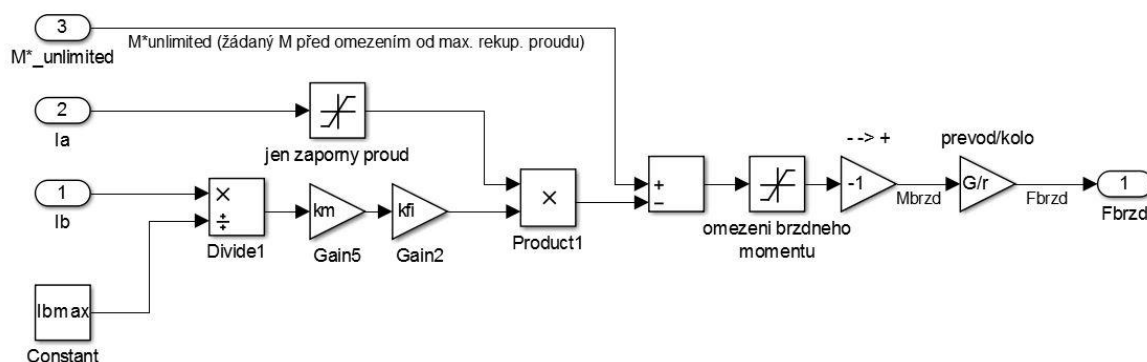


Obr. 31 Převod momentu na hřídeli na sílu na kolech

3.2.4 Brzda

Model brzdy má za úkol zvyšovat zátěžný moment v případě, kdy je rekuperační proud kotvy na své maximální hodnotě a přitom je nutné ještě intenzivnější zpomalování. Výpočet brzděné síly probíhá následovně:

Model brzdy porovnává žádaný a skutečný moment, pokud jsou oba záporné, znamená to, že vůz zpomaluje, a pokud je jejich rozdíl navíc kladný, znamená to, že vůz zpomaluje pomaleji, než je žádáno, tedy že dosáhl maximálního rekuperačního proudu. Pokud se tak stane, je vypočítán rozdíl mezi žádaným a skutečným brzděným momentem, ten je potom přepočítán na sílu a přičten k jízdám odporům jako brzděná síla.



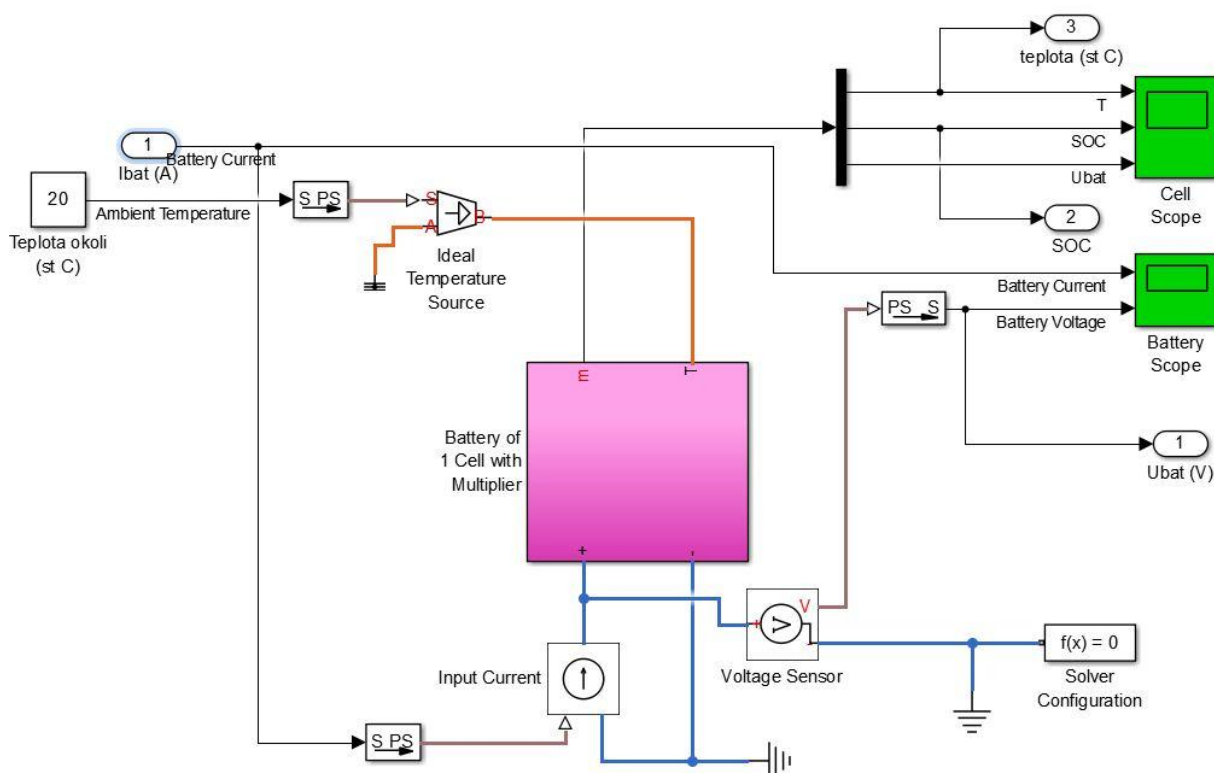
Obr. 32 Model mechanické brzdy

3.2.5 Battery Management System (Trakční akumulátor)

Vymýšlet model původního 100 Ah NiCd akumulátoru by nemělo příliš smysl, protože se zaprvé tento původní akumulátor nedochoval v provozuschopném stavu. Nyní jsou použity olověné a v budoucnu se plánuje použití lithiových akumulátorů, proto simulují plánovaný stav. Pro lepší přesnost jsem se rozhodl využít volně dostupný model lithiového akumulátoru vycházející z článku autora Robyna Jackeye.^[32] Model je možné stáhnout z webových stránek MATLAB Central.

Tento lithiový akumulátor má jmenovité napětí jednoho článku 3,7 V, při použití baterie o 44 článcích tak dosáhnou jmenovitého napětí 162,8 V, což je naprosto srovnatelné se jmenovitým napětím původního akumulátoru, který měl rovných 162 V.^[3] Jedna sériová větev baterie má kapacitu 28 Ah, v mém případě byly použity kvůli snížení úbytku napětí při maximálním odběru proudu větve tři, čímž jsem se dostal na celkovou kapacitu 84 Ah, což je podobná hodnota, jakou měla původní NiCd baterie.

Vstupem do modelu trakčního akumulátoru je vybíjecí (v případě rekuperace nabíjecí) proud a okolní teplota. Model pak velmi věrně simuluje pokles napětí baterie při vybíjení a oteplování baterie, dále je možné z modelu zjistit stav nabití (SOC) nebo napětí jednoho článku.



Obr. 33 Model jedné sériové větve akumulátoru

3.2.6 Pomocné elektrické spotřebiče

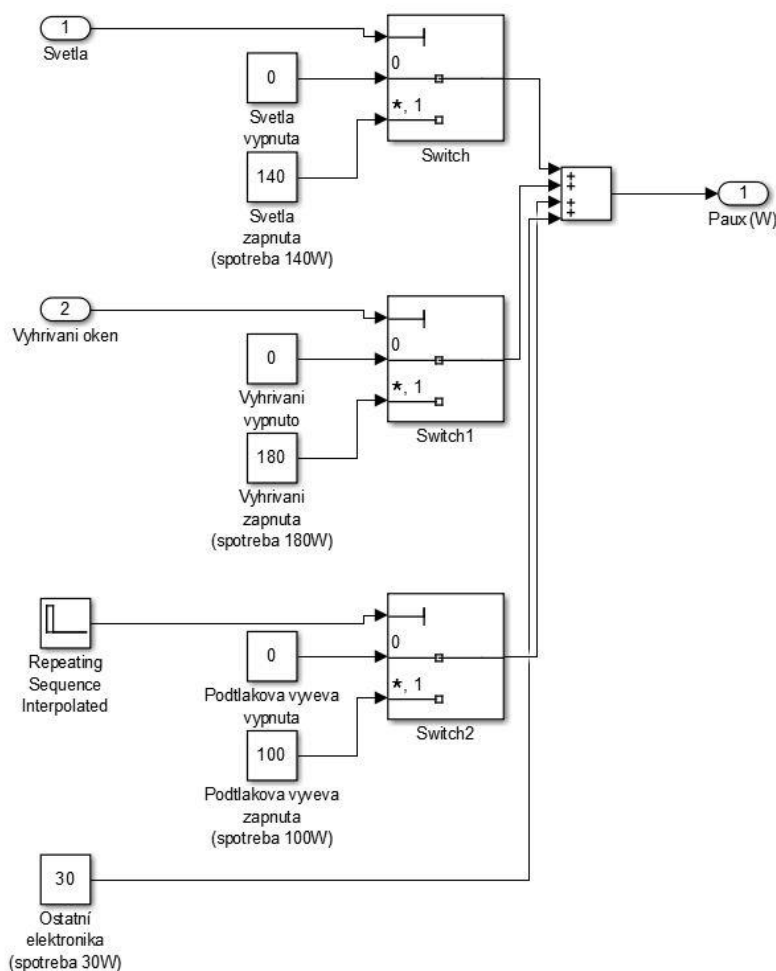
V bloku pomocných spotřebičů se vypočítává spotřeba energie, která neslouží přímo k pohybu vozidla, ale je nutné ji započítat do odběru z trakčního akumulátoru. Mezi pomocné spotřebiče jsem zahrnul světa (přední i zadní), vyhřívání zadního okna (pro zimní provoz), elektrickou vakuovou vývěvu posilovače brzd, posilovač řízení a ostatní elektroniku (palubní a řídicí počítače, kontrolky apod.). První dva jmenované spotřebiče jdou vypínat, ostatní z logických důvodů běží neustále.^[4]

Spotřebu světel jsem určil ze součtu příkonů rozsvícených žárovek, což je 2x přední tlumená nebo dálková (55 W), 2x přední obrysová (4W), 2x koncová (5W) a podsvícení přístrojů (cca 5W) a výsledek zaokrouhlil nahoru na celé desítky.

$$2 * 55 + 2 * 4 + 2 * 5 + 5 = 133 = 140 W$$

Celkový odebraný výkon pomocných spotřebičů P_{aux} [W] je poté přepočten na napětí baterie U_{bat} [V] a přičten k odběru proudu měničů kotvy a buzení jako I_{aux} [A].

$$I_{aux} = \frac{P_{aux}}{U_{bat}} \text{ [A]} \quad (3.10)$$



Obr. 34 Pomocné elektrické spotřebiče

3.2.7 Výpočet žádaného výkonu

Tento subsystém není nutný k simulaci provozu elektromobilu jako takového, ale slouží k porovnání naměřených hodnot s teoretickými předpoklady. V tomto bloku je počítáno, jaký okamžitý výkon P^* [W] je potřeba, aby mohlo vozidlo s danými parametry (hmotnost, čelní plocha, koeficient odporu vzduchu) přesně sledovat jízdní cyklus, tedy žádanou rychlost v^* [m.s⁻¹].

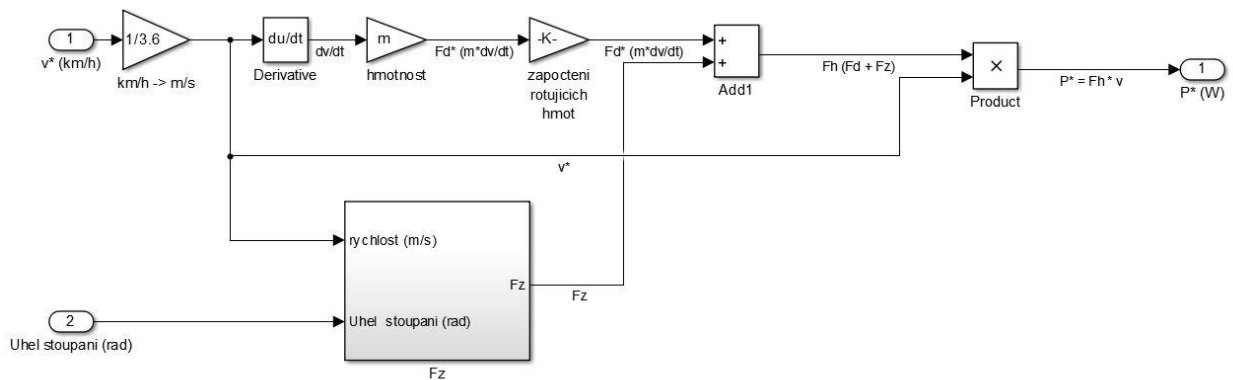
Z žádané rychlosti v^* [m.s⁻¹] je vypočítána potřebná dynamická síla F_d [N], která je nutná ke změně rychlosti vozidla o stanovené hmotnosti. K ní je připočtena zátěžná síla F_z [N], která je tvořena jízdními odpory. Jízdní odpory jsou závislé na hmotnosti m [kg], rychlosti v^* a koeficientech vyjadřující vlastnosti prostředí a je detailně vysvětlena v následující kapitole.

$$F_d = \frac{dv^*}{dt} * m [N] \quad (3.11)$$

$$F_h^* = F_d + F_z [N] \quad (3.12)$$

Součtem dynamické a zátěžné síly získám potřebnou hnací sílu F_h^* [N] a z hnací síly následně vypočtu teoretický potřebný urychlující (nebo rekuperační/brzdový) výkon P^* [W].

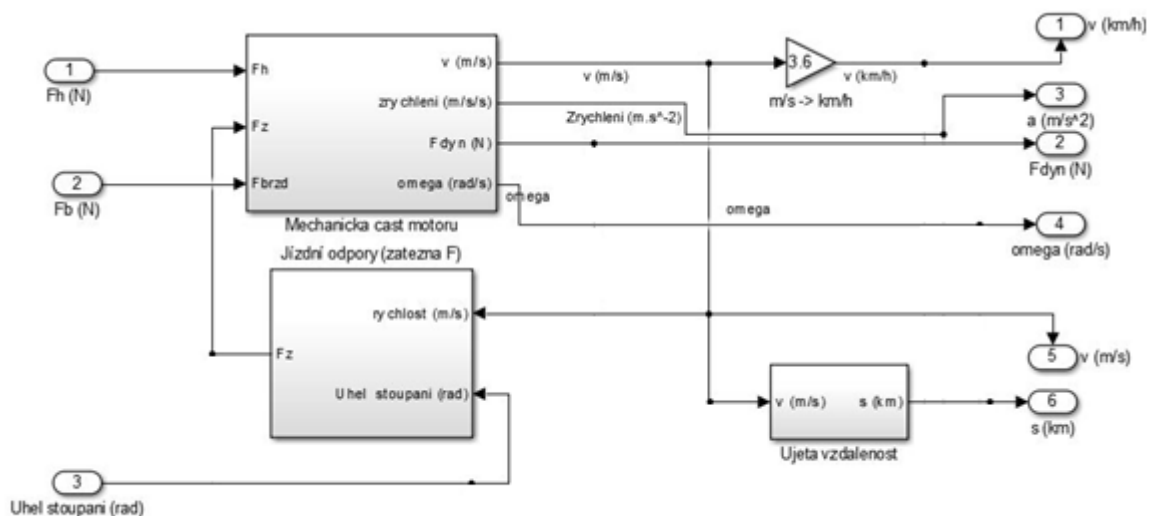
$$P^* = F_h^* * v^* [W] \quad (3.13)$$



Obr. 35 Výpočet žádaného výkonu

3.3 Mechanika a dynamika

V bloku mechaniky a dynamiky se z hnacích, případně brzdných síly počítají dynamické vlastnosti vozidla, jako otáčky motoru, rychlost, zrychlení nebo ujetá vzdálenost.



Obr. 36 Blok mechaniky a dynamiky

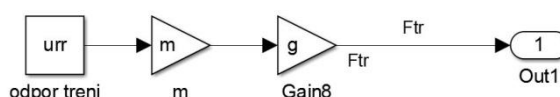
3.3.1 Jízdní odpory

V této podkapitole budou rozebrány jednotlivé jízdní odpory působící na vozidlo v pohybu. Patří sem valivý odpor, aerodynamický odpor, odpor způsobený profilem trati a odpor při jízdě v oblouku. Poslední jmenovaný má proti ostatním zanedbatelný vliv a proto v modelu není zahrnut.

3.3.1.1 Valivý odpor

Valivý odpor vzniká třením mezi pneumatikou a podloží. Je úměrný tíhovému zrychlení g [m.s^{-2}], hmotnosti vozu m [kg] a součinitelem tření u_{rr} [-] (viz Tabulka 9), který závisí na kvalitě pneumatiky a drsnosti podloží. Velikost třecí síly vypočteme z rovnice [23]:

$$F_{tr} = m * g * \mu_{rr} [N] \quad (3.14)$$

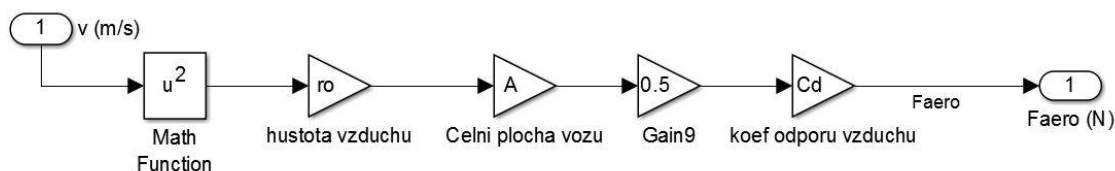


Obr. 37 Valivý odpor

3.3.1.2 Aerodynamický odpor

Odpor vzduchu je závislý na rychlosti vozu v [m.s^{-1}], na hustotě vzduchu ρ [kg.m^{-3}], na obsahu čelní plochy vozidla A [m^2] a na koeficientu aerodynamického odporu c_d [-]. Síla odporu vzduchu roste s druhou mocninou rychlosti vozidla, počítá se ze vztahu [22]:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} * A * \rho * c_d * v^2 [N] \quad (3.15)$$



Obr. 38 Aerodynamický odpor

3.3.1.3 Odpor stoupání

Odpor stoupání závisí na úhlu ψ [rad], jaký svírá povrch, po kterém elektromobil jede, s vodorovnou plochou. Pokud je sklon trasy záporný, tak síla, způsobená tímto odporem, nebude vozidlo brzdit, ale naopak urychlovat. Dále závisí, stejně jako třecí síla, na hmotnosti vozu m [kg] a tíhovém zrychlení g [m.s⁻²] [23].

$$F_{stoup} = m * g * \sin \psi \text{ [N]} \quad (3.16)$$

3.3.2 Mechanika

V této podkapitole vysvětlím výpočet mechanických veličin síly, zrychlení a ujeté dráhy.

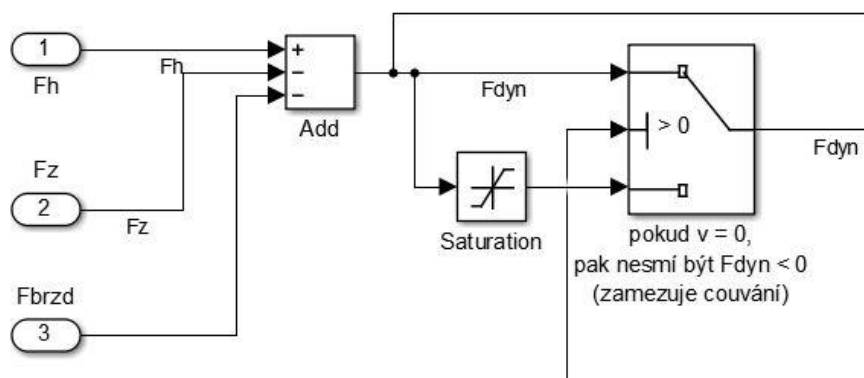
3.3.2.1 Výpočet dynamické síly

Dynamická síla F_{dyn} [N] se spočítá z pohybové rovnice jako rozdíl hnací F_h [N] a zátěžné síly F_z [N]. Zátěžná síla je tvořena jízdními odpory a v případě brzdění i silou brzdovou F_b [N] [2].

$$F_{dyn} = F_h - F_z - F_b \text{ [N]} \quad (3.17)$$

Jelikož třecí síla působí na vůz, i když stojí, vůz by na začátku simulace mohl začít couvat, což nechceme, proto jsem přidal ošetření, že pokud je rychlost menší nebo rovná nule, tak může na vůz působit pouze nezáporná dynamická síla.

Dynamická síla je v dalším kroku snížena o 3%, čímž zahrnuji energii akumulovanou v rotujících hmotách. Vozidlo má pouze malý podíl rotujících hmot, proto má energie v nich uložená velmi malý vliv.



Obr. 39 Výpočet dynamické síly

3.3.2.2 Výpočet zrychlení

Zrychlení a [$m \cdot s^{-2}$] vypočteme snadno jako poměr výsledné dynamické síly F_{dyn} [N] a hmotnosti vozu m [kg] z rovnice

$$a = \frac{F_{dyn}}{m} [m \cdot s^{-2}] \quad (3.18)$$

3.3.2.3 Výpočet ujeté vzdálenosti

Ujetá vzdálenost s [km] se počítá ze zrychlení a [$m \cdot s^{-2}$]. Pokud zintegrujeme zrychlení jednou, dostaneme rychlost v [$m \cdot s^{-1}$] pokud zintegrujeme zrychlení dvakrát, dostaneme ujetou dráhu s [m] [22]. Tedy

$$v = a dt \text{ } m \cdot s^{-1}, \quad s = v dt [m] \quad (3.19)$$

Pro přehlednost ve výsledcích je dráha přepočtena na kilometry.

3.4 Výpočty a výstupy simulace

Předposlední funkční blok modelu se nazývá výpočty a jsou do něj přivedeny důležité veličiny ze všech předchozích bloků. Zde se počítají elektrické a mechanické veličiny jako výkon, příkon, účinnost nebo spotřeba energie.

3.4.1 Výpočet výkonu a příkonu

Rozlišujeme elektrický výkon P_{el} , elektrický příkon $P_{p,el}$, celkový elektrický příkon P_{celk} (součet elektrického příkonu motoru a příkonu pomocných spotřebičů) a mechanický výkon na kolech P_{mech} .

Elektrický výkon motoru P_{el} vypočítáme jako součet součinu indukovaného napětí U_i [V] a proudu kotvy I_a [A] a součinu budícího napětí U_b [V] a proudu I_b [A]:

$$P_{el} = U_i * I_a + U_b * I_b [W] \quad (3.20)$$

Elektrický příkon $P_{p,el}$ vypočítáme jako součet součinu kotevního napětí U_a [V] a proudu I_a [A] a součinu budícího napětí U_b [V] a proudu I_b [A]. Výsledný příkon je poté nutné vydělit účinností měniče η_m [-], která činí 98 %. Elektrický příkon se dále dělí na kladný a záporný, aby se dal jasně rozdělit příkon dodávaný motorem a výkon přiváděný při rekuperaci do akumulátoru:

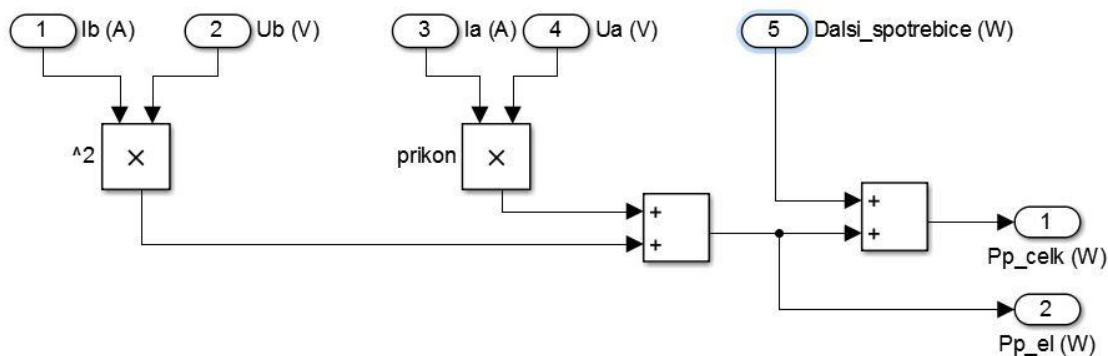
$$P_{p,el} = U_a * I_a + U_b * I_b * \frac{1}{\eta_m} [W] \quad (3.21)$$

Celkový elektrický příkon P_{celk} vypočítáme jako součet elektrického příkonu P_{p_el} [W] a příkonu pomocných obvodů P_{aux} [W]:

$$P_{celk} = P_{p_el} + P_{aux} [W] \quad (3.22)$$

Mechanický výkon na kolech P_{mech} [W] spočítáme jako součin rychlosti vozu v [m.s⁻¹] a hnací síly F_h [N]:

$$P_{mech} = F_h * v [W] \quad (3.23)$$



Obr. 40 Subsystém výpočtu příkonu pohonu a příkonu celého vozu

3.4.2 Výpočet spotřeby

Energie W [J], jaká byla během jízdního cyklu spotřebována, se vypočítá jako integrál příkonu P [W]. Pro lepší názornost spotřeby je vhodné ji přepočítat na kilowatthodiny. Opět rozlišuji několik veličin, a to energii spotřebovanou pohonem W_p [kWh], energii spotřebovanou celým vozidlem W_{celk} [kWh], energii spotřebovanou vozidlem bez rekuperace W_{bez_rekup} [kWh] a energii rekuperovanou, která byla do akumulátoru vrácena rekuperací W_{rekup} [kWh].

Energie spotřebovaná pohonem W_p se určí jako

$$W_p = \int P_{p_el} dt [J] \quad (3.24)$$

Energie spotřebovaná celým vozidlem W_{celk} se určí ze vzorce

$$W_{celk} = \int P_{p_celk} dt [J] \quad (3.25)$$

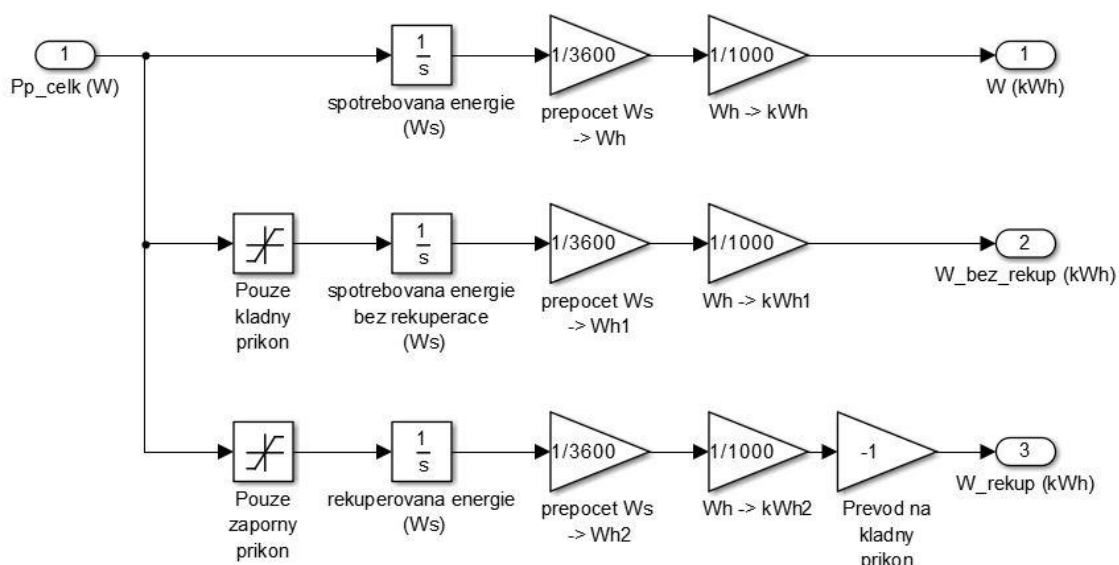
Energie spotřebovaná vozidlem bez rekuperace W_{bez_rekup} [J] se určí stejně jako energie spotřebovaná vozidlem W_{celk} , ale při integrování použijeme pouze kladné hodnoty celkového

příkonu. Rekuperovaná energie W_{rekup} se pak může určit podobně jako energie bez rekuperace, jen se budou integrovat pouze záporné hodnoty příkonu, nebo jednodušším způsobem ze vztahu

$$W_{rekup} = W_{celk} - W_{bezrekup} [J] \quad (3.26)$$

Všechny vypočtené energie pře počteme z Jouleů na Kilowatthodiny pomocí vztahu

$$W = W [J] * \frac{1}{3600} * \frac{1}{1000} [kWh] \quad (3.27)$$



Obr. 41 Blok výpočtu spotřeb

3.4.3 Výpočet účinnosti

Vzhledem k tomu, že jsem v předchozích kapitolách této práce vypočítal několik různých výkonů a příkonů, je nasnadě, že bude cenným ukazatelem, pokud tyto výkony a příkony porovnám a tak vypočítám účinnosti. Proto také rozlišuji několik druhů účinností, které vyjadřují jak účinnosti jednotlivých funkčních bloků, jako účinnost pohonu či mechanická účinnost, tak i účinnost elektromobilu jako celku.

Efektivitu motoru popisuje elektrická účinnost η_{el} [-], která je definovaná jako poměr elektrického výkonu P_{el} [W] a elektrického příkonu $P_{p,el}$ [W] [22]

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{p,el}} [-] \quad (3.28)$$

Mechanická účinnost η_{mech} [-] popisuje efektivitu přeměny momentu z motoru na kolo a je určena jako poměr výkonu na kolech P_{mech} [W] a elektrického výkonu P_{el} [W] [22]

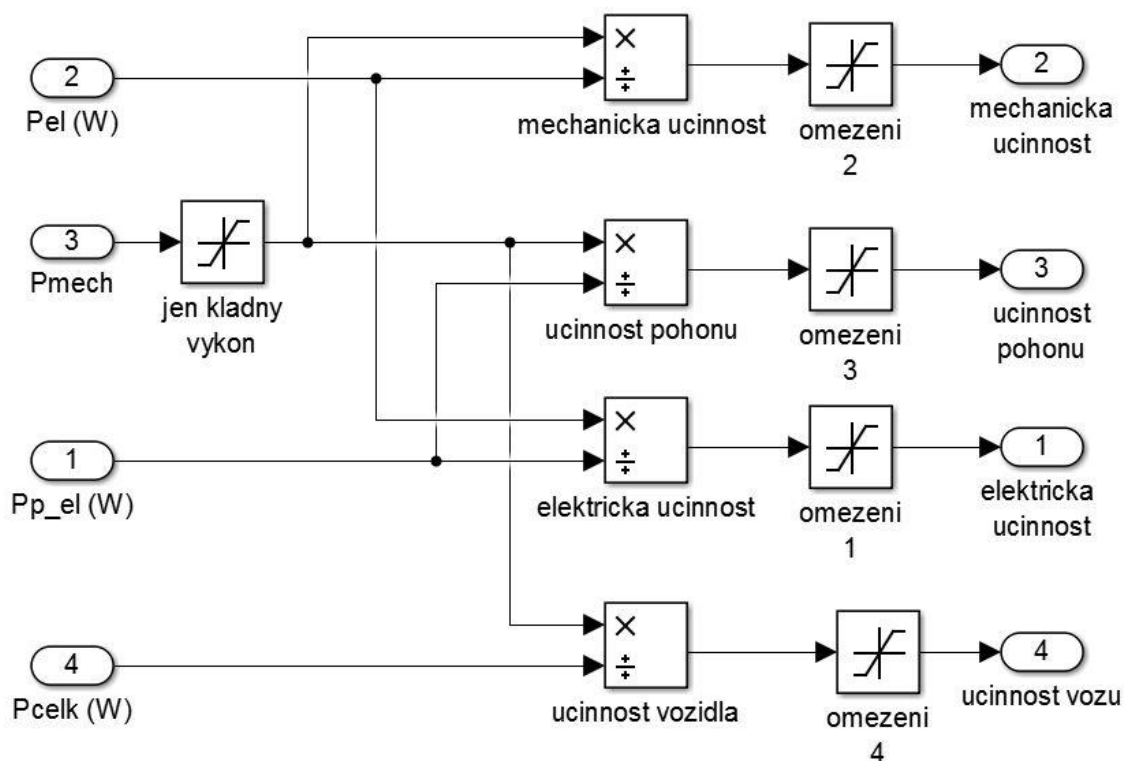
$$\eta_{mech} = \frac{P_{mech}}{P_{el}} [-] \quad (3.29)$$

Další neméně důležitou účinností je účinnost pohonu η_{pohon} [-] popisuje efektivitu celé soustavy od baterie až po kola a je definována jako poměr výkonu na kolech P_{mech} [W] a elektrického příkonu $P_{p,el}$ [W] [22]

$$\eta_{pohon} = \frac{P_{mech}}{P_{p,el}} [-] \quad (3.30)$$

Výběr účinností doplňuje celková účinnost η_{celk} [-], která též vyjadřuje účinnost celé soustavy od baterie až po kola, ale navíc je v ní zahrnuta i spotřeba pomocných elektrických spotřebičů, které se nepodílejí na hnací síle, jako například světla nebo vývěva posilovače brzd. Je určena jako podíl výkonu na kolech P_{mech} [W] a celkového elektrického příkonu P_{celk} [W] [22]

$$\eta_{celk} = \frac{P_{mech}}{P_{celk}} [-] \quad (3.31)$$



Obr. 42 Subsystém výpočtu účinností

4 Chování modelu při různých jízdních cyklech

V následujících podkapitolách se budu zabývat výsledky, jaké vzešly ze simulací průjezdu elektromobilu jízdními cykly. Zde budou nejprve představeny průběhy důležitých parametrů v jednotlivých cyklech, jako rychlost, výkon, kotevní proud nebo účinnost, poté budou tyto parametry shrnuty do celkových a průměrných hodnot v tabulce. Všechny naměřené průběhy by bohužel zabíraly spoustu místa, proto jsem se rozhodl je zařadit mezi přílohy.

4.1 Jízdní cykly

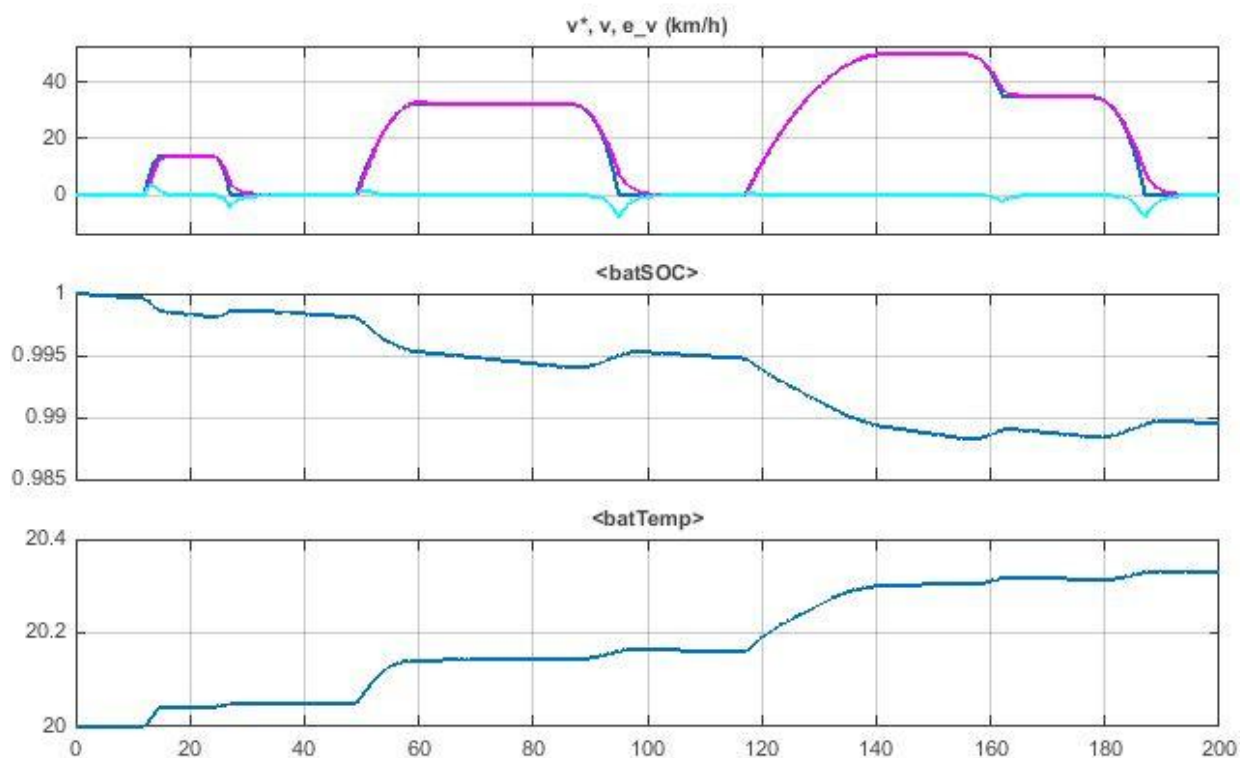
V každém uvedeném průběhu jízdního cyklu je na vodorovné ose vyneseno čas t v sekundách. Na svislých osách jsou jednotky, které jsou uvedeny v závorce nad každým grafem, stejně jako název zobrazovaných veličin. U výkonu jsou to Watty, u proudu Ampéry, u rychlosti kilometry za hodinu a u teploty baterie stupně Celsia.

Pokud je v jednom grafu více průběhů, jsou odlišeny barvami, které odpovídají pořadí, v jakém jsou uvedeny nad každým grafem. První uvedený průběh má vždy barvu **tmavě modrou**, druhý průběh barvu **fialovou**, třetí průběh barvu **světle modrou** a čtvrtý průběh **červenou**. Více než 4 průběhy v jednom grafu se nevyskytují. V následující tabulce jsou popsány měřené veličiny.

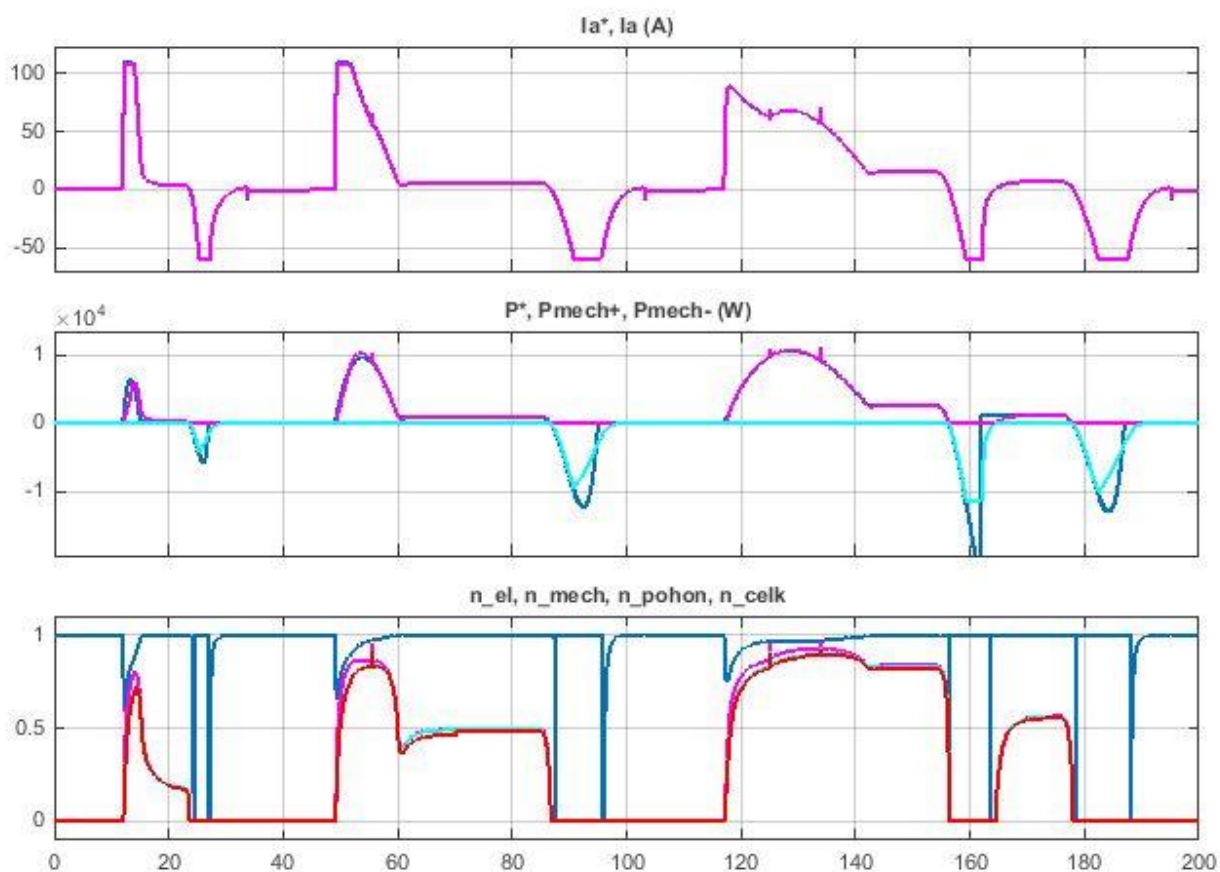
Tabulka 11 Seznam měřených veličin

v^*	žádaná rychlost	km/h
v	skutečná rychlost	km/h
e_v	regulační odchylka rychlosti	km/h
bat SOC	stav nabití baterie	-
bat Temp	teplota baterie	°C
I_a^*	žádaný proud kotvou	A
I_a	skutečný proud kotvou	A
P^*	žádaný mechanický výkon	W
P_{mech+}	dodávaný mechanický výkon	W
P_{mech-}	rekuperační mechanický výkon	W
n_{el}	elektrická účinnost	-
n_{mech}	mechanická účinnost	-
n_{pohon}	účinnost pohonu	-
n_{celk}	celková účinnost vozidla	-

4.1.1 Jízdní cyklus ECE-15

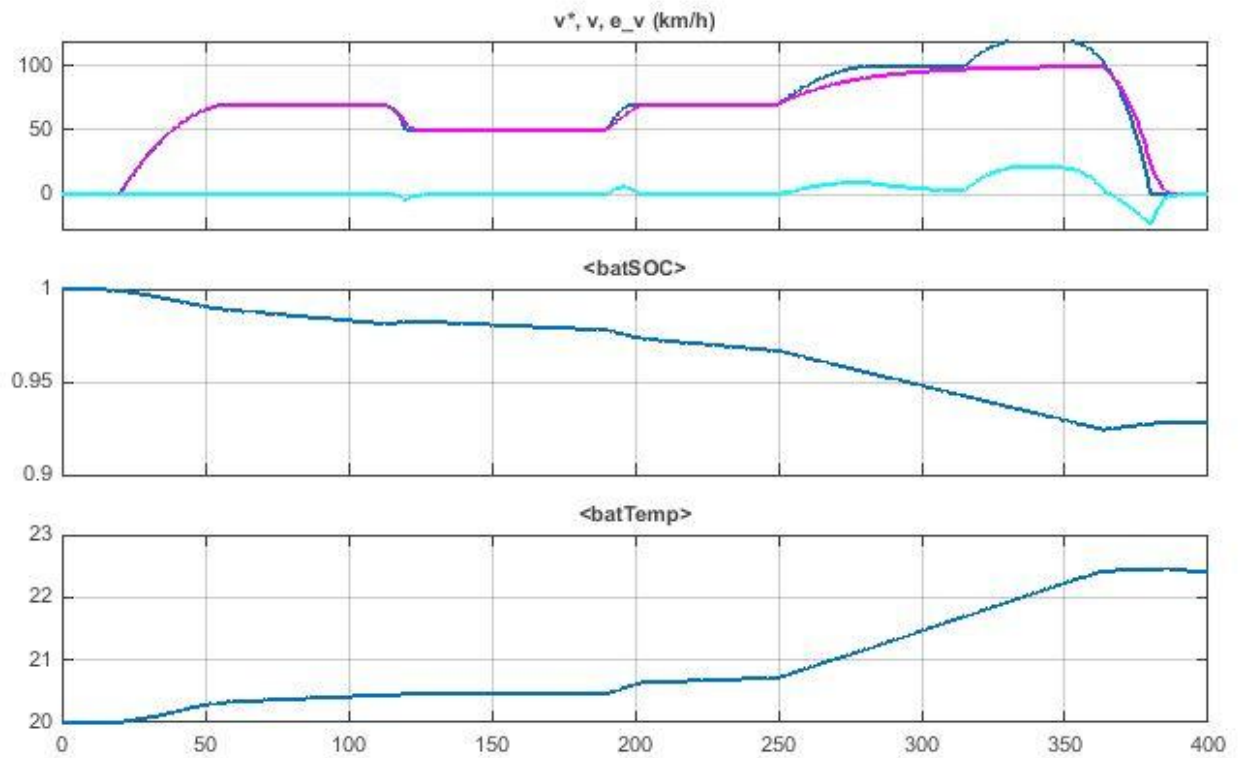


Obr. 43 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu ECE-15

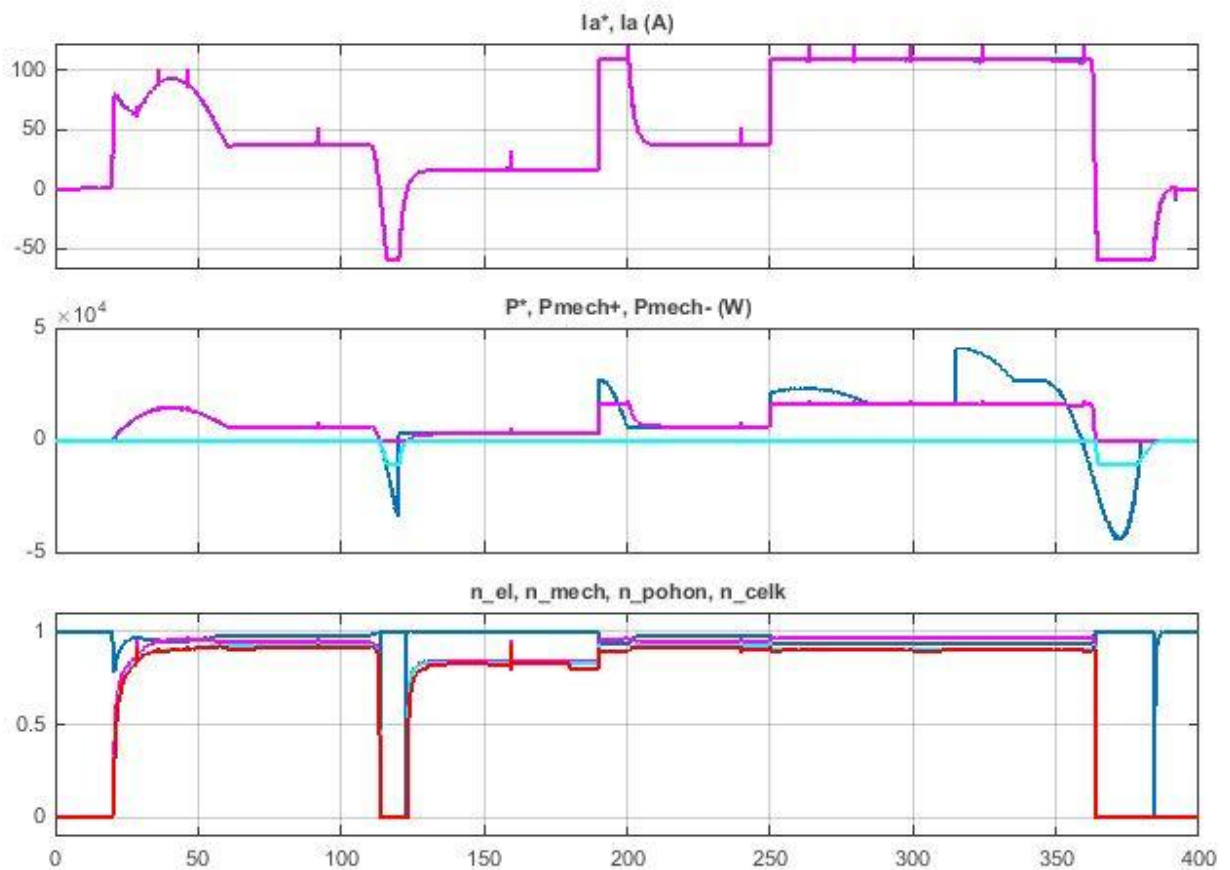


Obr. 44 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu ECE-15 (UDC)

4.1.2 Jízdní cyklus EUDC

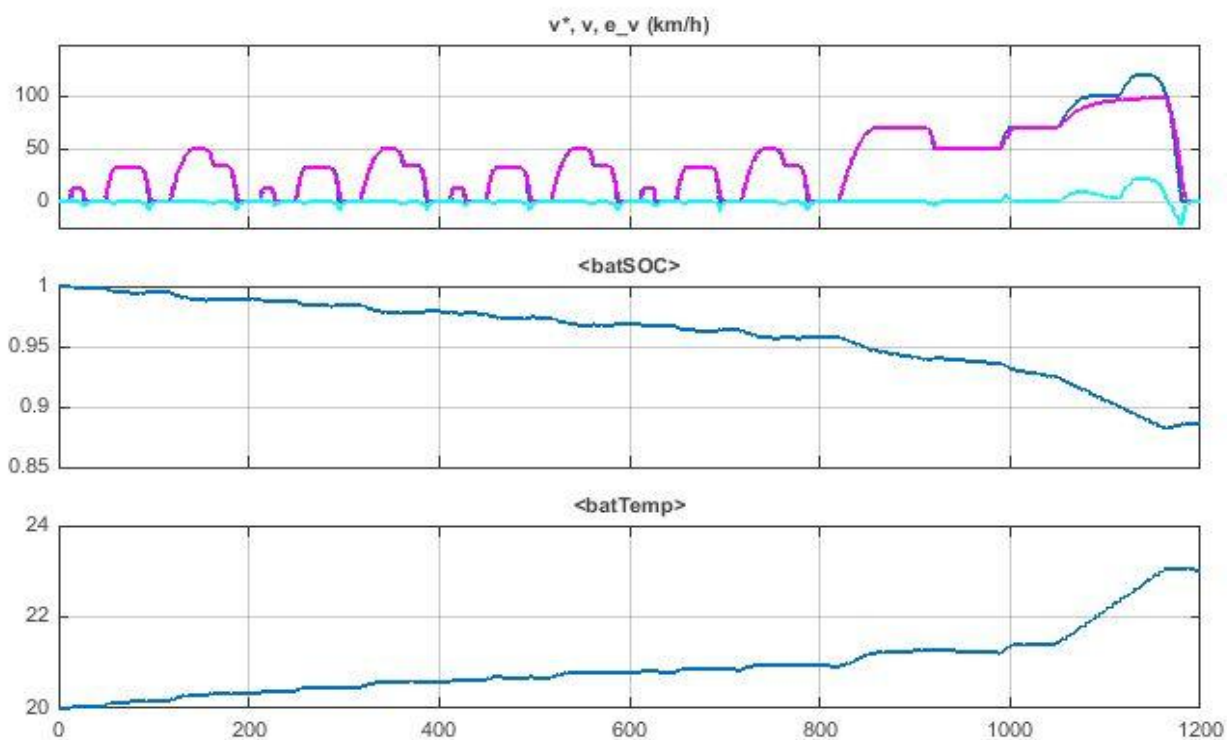


Obr. 45 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu EUDC

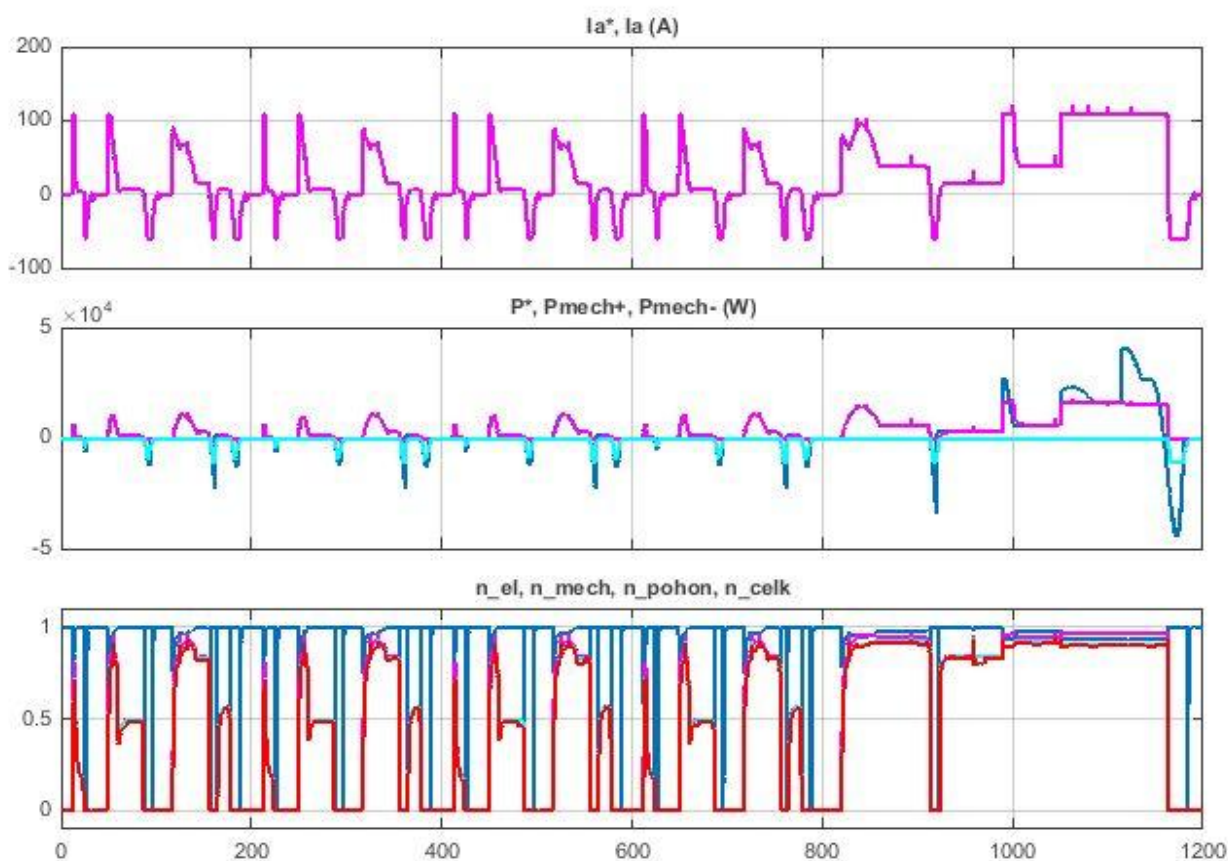


Obr. 46 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu EUDC

4.1.3 Jízdní cyklus NEDC

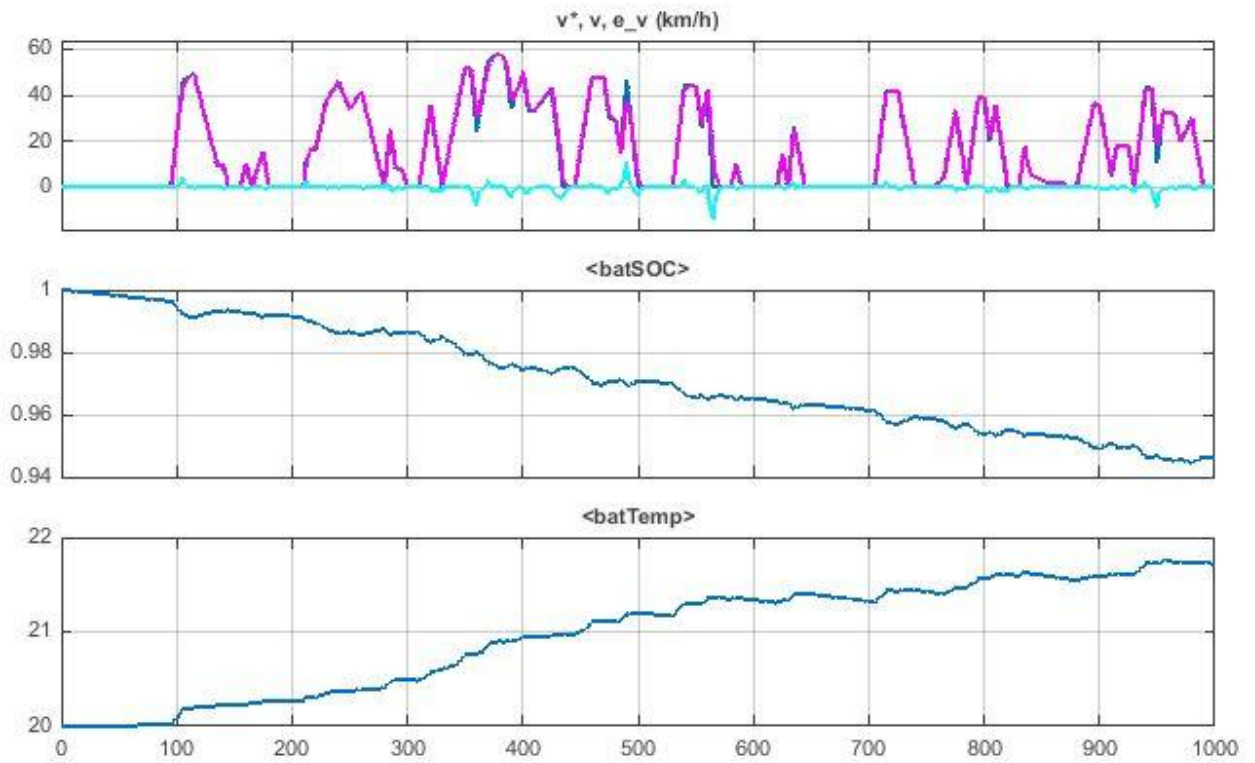


Obr. 47 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu NEDC

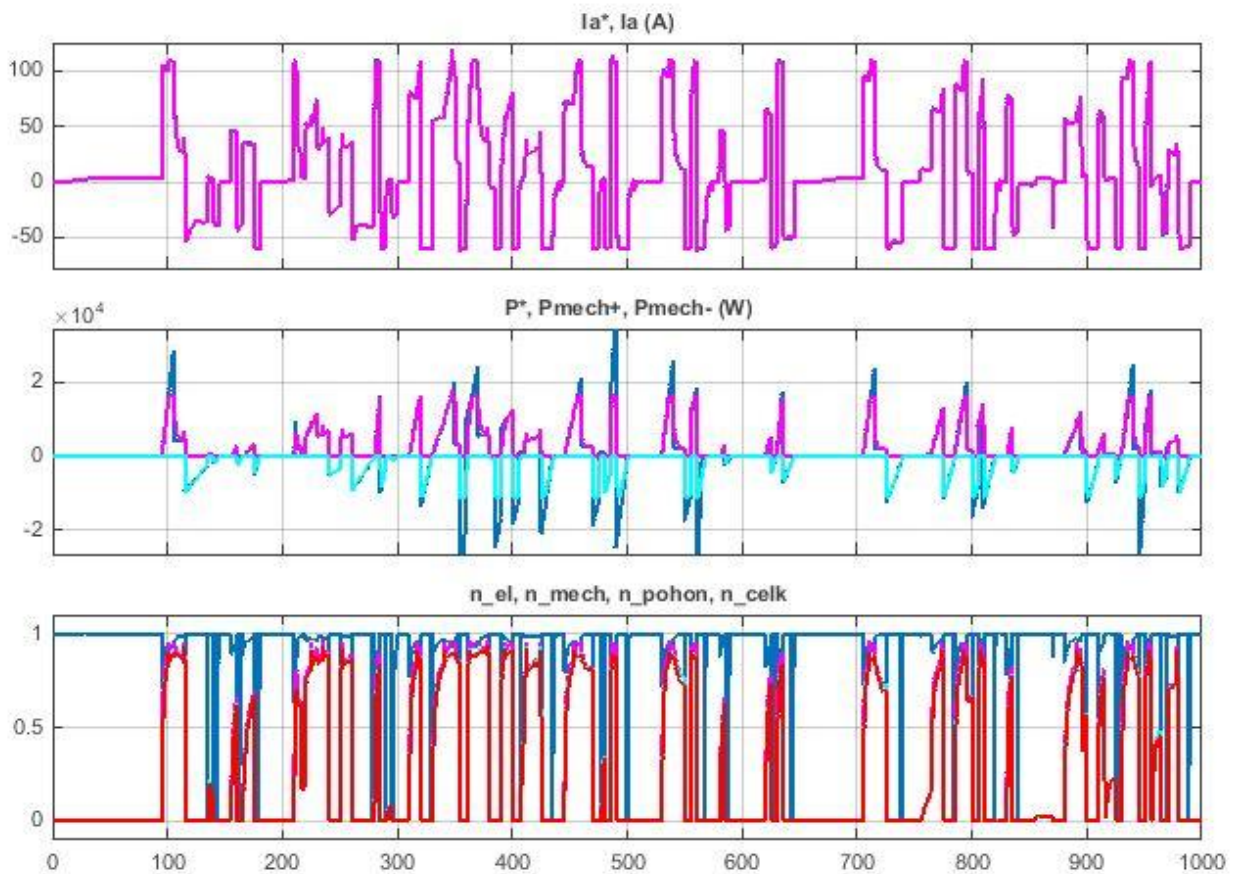


Obr. 48 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu NEDC

4.1.4 Jízdní cykly Artemis Urban

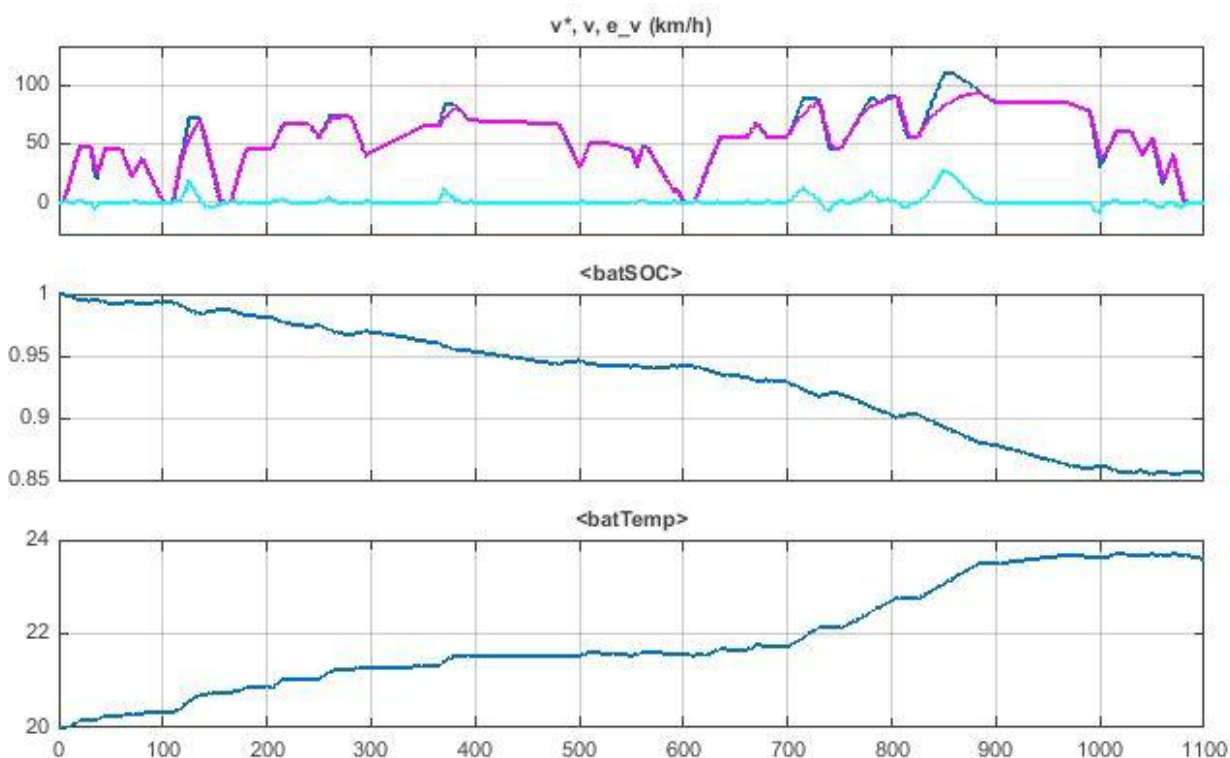


Obr. 49 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu Artemis Urban

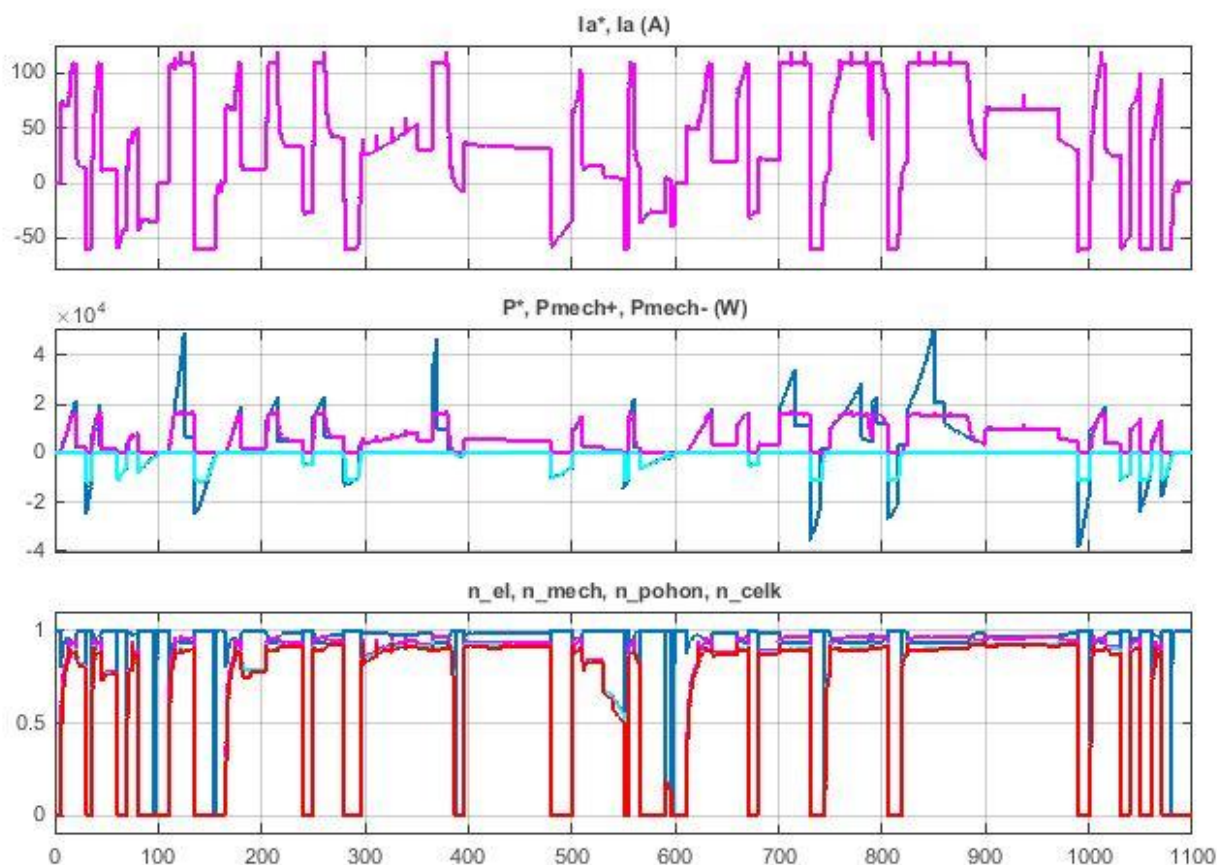


Obr. 50 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu Artemis Urban

4.1.5 Jízdní cykly Artemis Rural

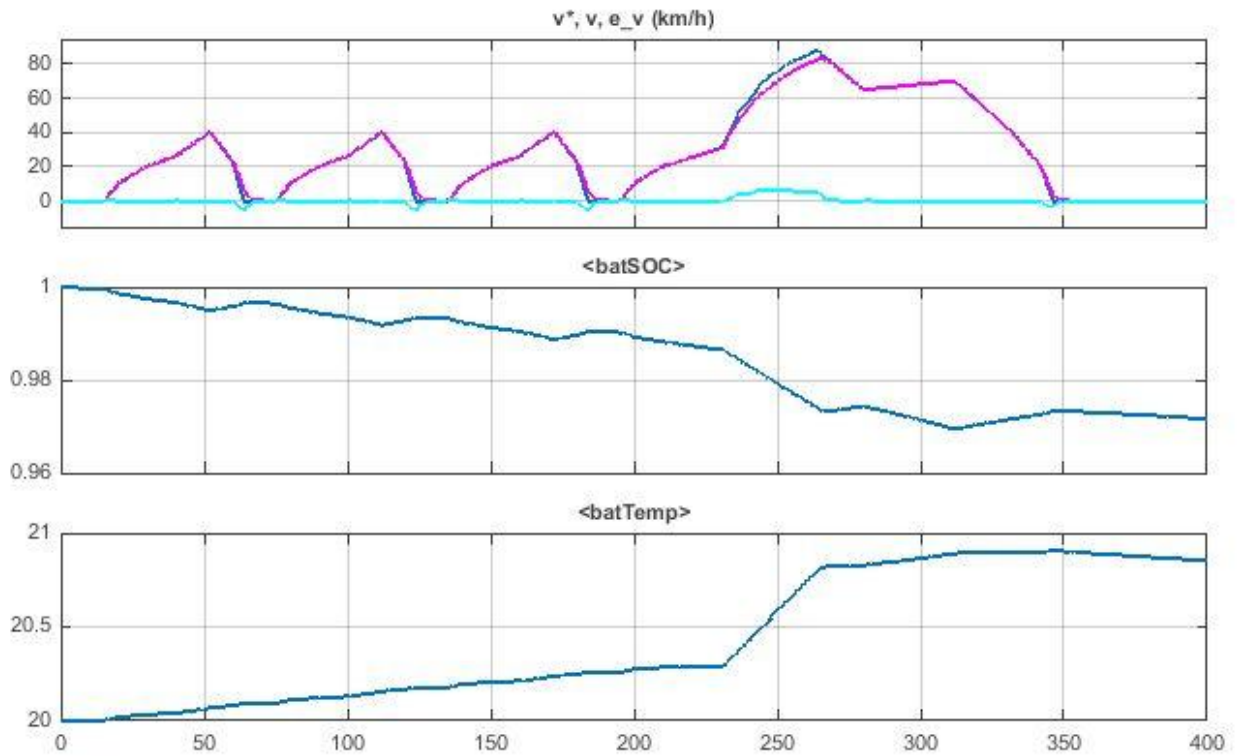


Obr. 51 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu Artemis Rural

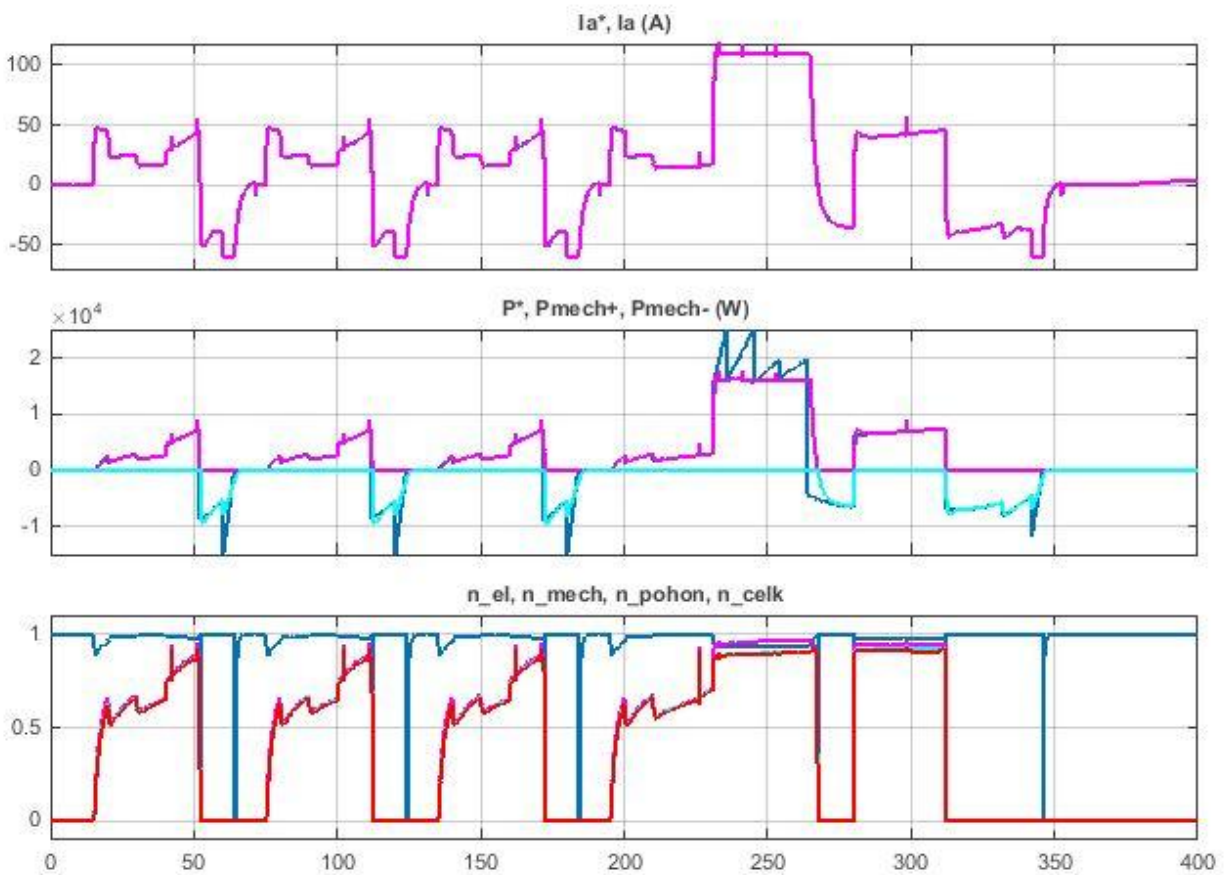


Obr. 52 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu Artemis Rural

4.1.6 Americké jízdní cyklus SFUD

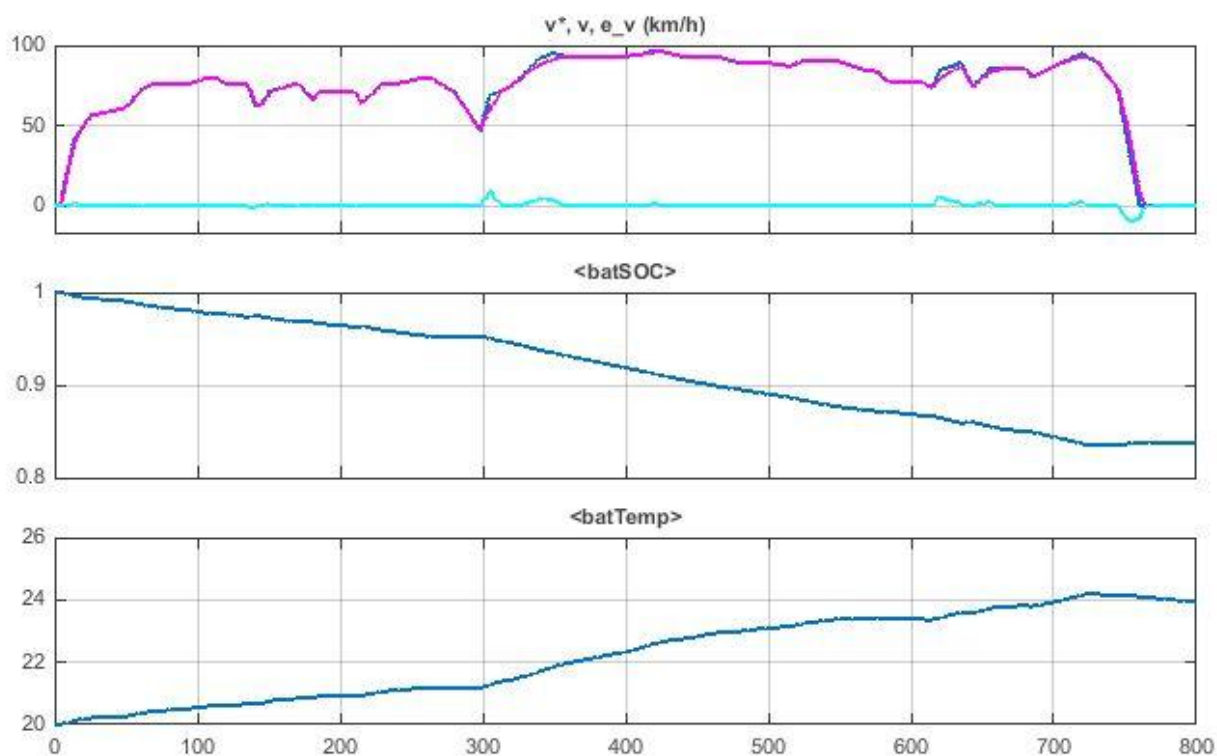


Obr. 53 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu SFUD

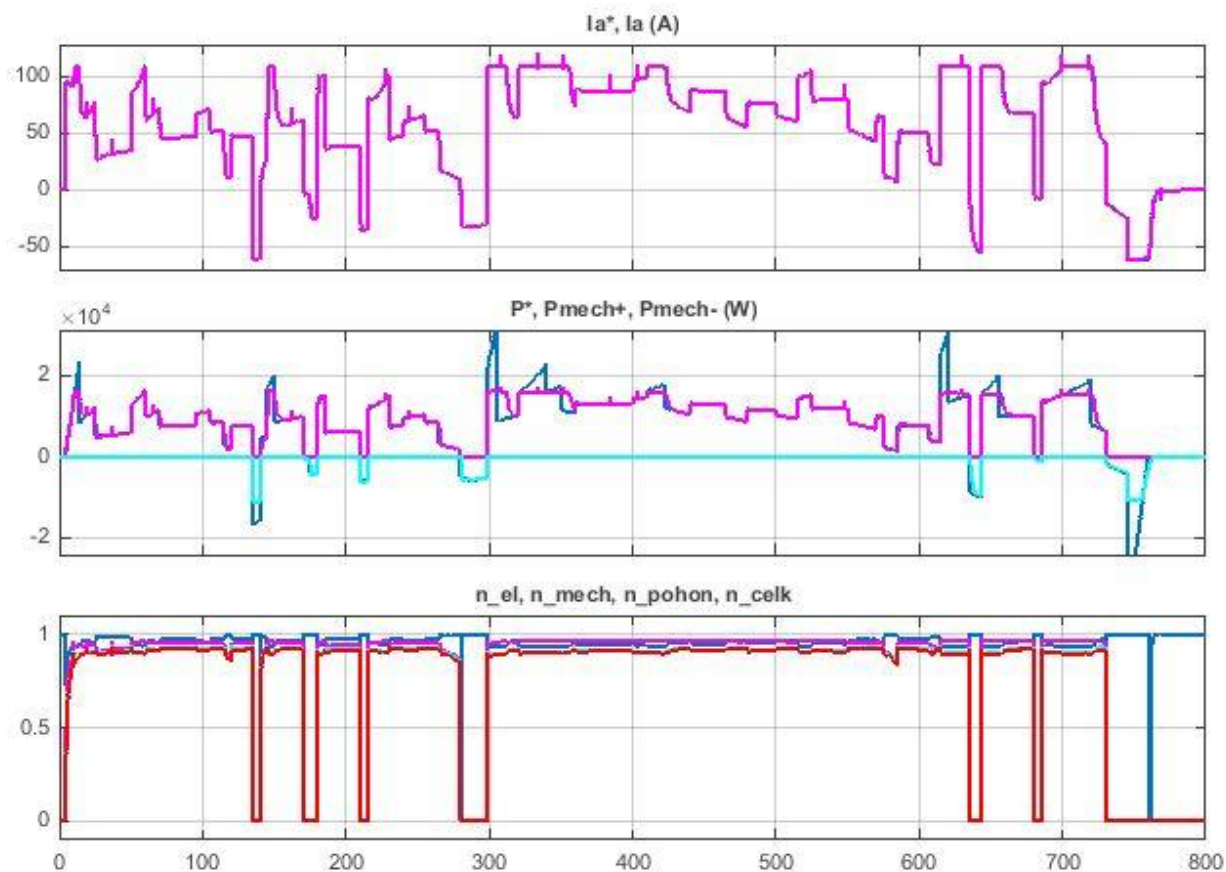


Obr. 54 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu SFUD

4.1.7 Americký jízdní cyklus HWFET



Obr. 55 Průběh rychlostí a parametrů akumulátoru v cyklu HWFET



Obr. 56 Průběh kotevního proudu, výkonů a účinností v cyklu HWFET

4.2 Porovnání a zhodnocení výsledků z jednotlivých jízdních cyklů

V následující tabulce je porovnání výkonových parametrů, jakých elektromobil dosáhl v průběhu jízdních cyklů.

Tabulka 12 Naměřené hodnoty v simulaci

Číslo cyklu	1	2	3	4	5	6	7
Název cyklu	UDC	EUDC	NEDC	Artemis Urban	Artemis Rural	SFUD	HWFET
Typ cyklu	Městský	Městský	Městský	Městský	Mimo-městský	Městský	Mimo-městský
Čas cyklu [s]	200	400	1200	1000	1100	400	800
Dráha cyklu [km]	1,26	7,35	11,83	4,41	16,99	3,09	16,55
Průměrná rychlost [km/h]	22,7	66,2	35,5	15,9	55,6	27,8	74,5
Maximální žádaný výkon [kW]	10,7	41,0	41,0	39,5	50,6	26,1	32,6
Průměrný žádaný výkon [kW]	0,8	8,0	3,2	0,6	4,8	1,8	8,4
Skutečná dráha [km]	1,15	7,02	11,59	4,53	16,63	3,05	16,47
Skutečná průměr. Rychl. [km/h]	20,6	63,2	34,8	16,3	54,4	27,5	74,1
Energie zbývající v aku [%]	98,9%	92,7%	88,3%	94,4%	85,2%	97,1%	83,2%
<i>se světly</i>	98,8%	92,6%	87,9%	94,2%	84,8%	96,0%	83,0%
Oteplení aku [K]	0,35	2,45	3,1	1,8	3,74	0,89	4,15
Spotřebovaná energie [kWh]	0,129	0,98	1,48	0,66	1,91	0,35	2,23
<i>se světly</i>	0,137	0,99	1,53	0,70	1,95	0,36	2,27
Spotř. energie bez rekup. [kWh]	0,165	1,05	1,70	0,99	2,34	0,48	2,36
<i>se světly</i>	0,171	1,06	1,74	1,02	2,37	0,49	2,39
Podíl rekuperace [%]	21,7%	6,7%	12,6%	33,7%	18,3%	26,8%	5,3%
<i>se světly</i>	20,3%	6,5%	11,9%	31,9%	17,6%	25,5%	5,1%
Průměrná spotřeba [kWh/km]	0,113	0,139	0,128	0,146	0,115	0,114	0,136
<i>se světly</i>	0,119	0,141	0,132	0,154	0,117	0,119	0,138
Průměrná odchylka rychlosti [km/h]	2,1	3,0	0,7	-0,4	1,2	0,4	0,4
Maximální odchylka rychlosti [km/h]	8,5	22,6	23,1	11,3	28,7	7,7	9,2
Průměrný dodávaný výkon [kW]	1,76	7,88	3,78	2,32	6,36	3,03	9,07
Maximální dodaný výkon [kW]	10,7	15,73	15,5	15,8	15,8	15,8	15,8
Průměrný výkon rekuperace [kW]	0,804	0,642	0,747	1,444	1,478	1,29	0,575
Maximální výkon rekuperace [kW]	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9
Průměrná účinnost pohonu [%]	37,3%	78,1%	51,9%	37,5%	64,6%	44,1%	77,2%

Z naměřených průběhů je patrné, že vzhledem k nízkému maximálnímu výkonu je vhodné tento elektromobil provozovat hlavně ve městě a jeho blízkém okolí, protože se zde doprava pohybuje převážně nízkými rychlostmi. Vozidlo je sice schopné dosáhnout rychlosti přes 90 km/h,

ale tyto podmínky jsou pro jeho provoz značně nevýhodné, protože kvůli ne úplně příznivé aerodynamice v těchto rychlostech výrazně stoupá aerodynamický odpor a tím i spotřeba energie. V těchto rychlostech také nezanedbatelně klesá schopnost vozu akcelarovat. Naopak v městském provozu se vůz pohybuje malými rychlostmi, takže odpor vzduchu není tolik výrazný, navíc jsou zde časté rozjezdy a zastavování, kde se může uplatnit rekuperace. To potvrzují i naměřená data, kdy v nízkorychlostních městských cyklech dosáhl podíl rekuperované energie až 33% z celkové spotřeby.

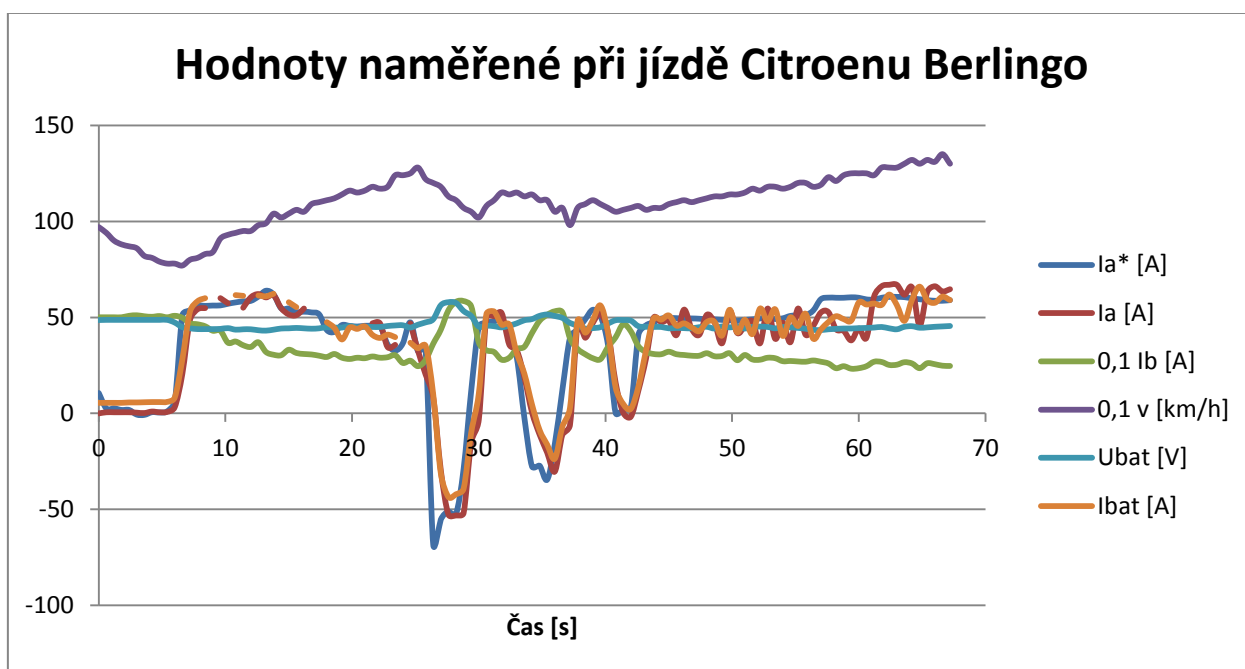
Plnění žádané rychlosti jízdních cyklů zvládá elektromobil správně, pouze, jak už jsem zmínil, při rychlostech přes 60 km/h má problémy plnit zadanou akceleraci z důvodu nízkého výkonu motoru. To se odráží na nižší průměrné rychlosti během cyklu, protože ujede za stanovený čas menší vzdálenost. Účinnost pohonu během akcelerace nebo rovnoměrné jízdy je vysoká, pohybuje se kolem 90%.

Zajímavé také je, že i když vůz používá pro svícení energeticky nevýhodné klasické žárovky, jejich vliv na spotřebu je téměř zanedbatelný, s rozsvícenými světly vůz spotřebovává pouze o 1% energie na kilometr více, než bez světel.

Z výsledků je také patrné, že použité lithiové akumulátory není nutné aktivně chladit, protože se ohřívají pouze minimálně. I při největší zátěži, kterým je pro toho vozidlo jinak nevhodný mimoměstský cyklus HWFET, odpovídající svým průběhem spíše cyklu dálničnímu, se po 13 minutách akumulátor ohřál pouze 4 °C. O aktivním chlazení by ale bylo vhodné uvažovat, pokud by se pro nabíjení akumulátorů používalo rychlonabíjení, při něm je vývin tepla intenzivnější a při vyšších okolních teplotách by se mohly akumulátory nebezpečně ohřát.

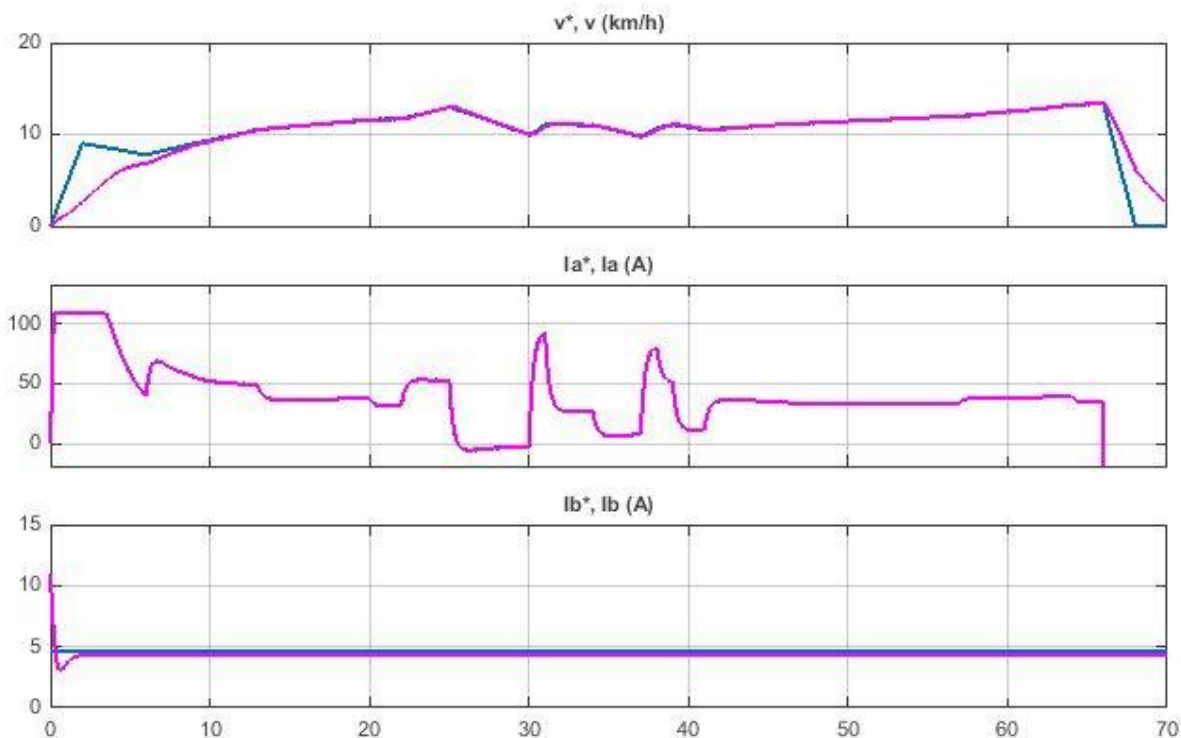
5 Měření na vozidle

Jedním z hlavních cílů práce je i porovnání hodnot získaných ze simulací se skutečnou jízdou elektromobilu. Kolegům, kteří pracovali na měničích elektromobilu, se podařilo naměřit jeden průběh krátké jízdy s 50V akumulátorem, tak jsem podle naměřených dat namodeloval „jízdni cyklus“ a simuloval tuto krátkou jízdu. Na následujícím grafu jsou hodnoty, které byly naměřeny přímo při jízdě elektromobilu. Měřené veličiny jsou žádaný proud kotvou I_a^* [A], skutečný proud kotvou I_a [A], proud buzením I_b [A], rychlost v [km.h⁻¹], napětí baterie U_{bat} [V] a proud baterie I_{bat} [A].

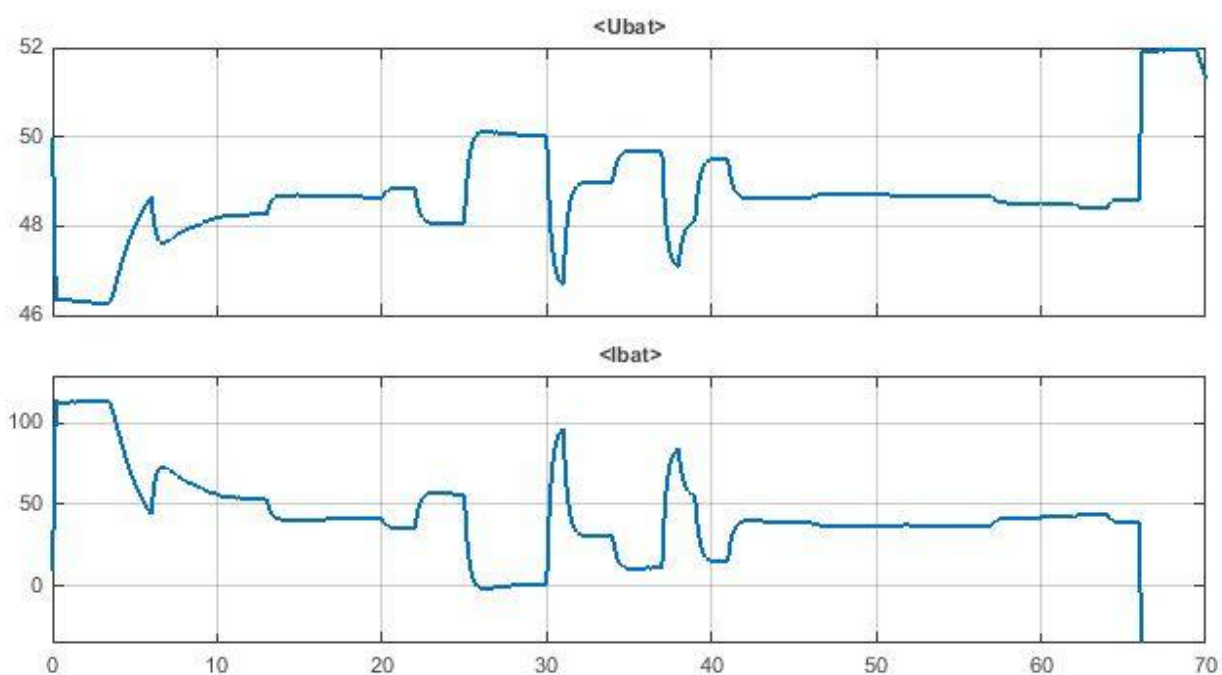


Obr. 57 Průběhy naměřené reálným elektromobilem

Pro porovnání, zde jsou průběhy, jež vznikly simulací přesně podle rychlosti, jakou se vůz pohyboval. Jediný rozdíl je, že nezačínají už z pohybu, jako měření na reálném voze, ale simulace vyžaduje, aby simulované vozidlo začínalo s nulovou rychlostí. Simulované průběhy jsou žádaná rychlost v^* a skutečná rychlost v [km.h⁻¹], žádaný I_a^* a skutečný proud kotvou I_a [A], napětí baterie U_{bat} [V] a proud baterie I_{bat} [A].



Obr. 58 Nasimulované hodnoty rychlosti, kotevního a budícího proudu



Obr. 59 Nasimulované průběhy napětí a proudu baterií

Porovnání skutečně naměřených a odsimulovaných hodnot není jednoduché, protože naměřené hodnoty průběhy jsou velmi zvlněné. Tvar průběhů ale přibližně odpovídá simulaci. Simulační model musel být upraven, protože vozidlo bylo napájeno pouze 50V trakční baterií a měření bylo provedeno na dlažbě, což je povrch s vyšším součinitelem valivého odporu, než asfalt použitý v simulaci jízdních cyklů.

Rozdíl je vidět v hodnotě kotevního proudu I_a [A], který se v simulaci při ustálené jízdě pohybuje kolem 40 A, zatímco podle naměřených hodnot se drží kolem hodnoty 50 A. Tento rozdíl je způsoben zaprvé možnou menší zatuhlostí ložisek a tím větší zátěžnou silou, a zadruhé napájením, protože pro testování elektromobilu byla použita pouze 50 V baterie. Díky tomu není možné motor plně nabudit a pro stejný hnací moment je tak nutný větší proud kotvou. Tomu odpovídá i větší rekuperační proud v případě brzdění, opět pro stejný brzdný moment při menším budícím proudu je nutný větší proud. Při zahrnutí této podmínky a přihlédnutí k šumu průběhů simulace odpovídá skutečnosti.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo modelování jízdních vlastností elektromobilu Citroën Berlingo Electrique za pomoci simulačního prostředí Simulink programu MATLAB R2014b. Dalšími úkoly bylo představit možné způsoby pohonu elektromobilů, typy motorů, používané jízdní cykly pro testování automobilů.

Nejdříve jsem se zaměřil na elektromobil jako takový, druhy motorů a způsoby pohonu. Některé typy motorů jsou již zastaralé a v dnešní době pro provoz v elektromobilu nepřiliš vhodné. Některé se naopak rozšířily až v poslední době s nástupem moderní výkonové elektroniky. V dnešní době dominují dva typy motorů a těmi jsou synchronní a asynchronní motor, které mají výhodu ve své bezúdržbovosti a dlouhé životnosti, která převyšuje životnost vozidla. Synchronní motor je používán k pohonu většiny komerčně vyráběných elektromobilů a nejčastěji je buzen permanentními magnety. Používá se jak v klasickém provedení, tak i jako nábojový motor vestavený přímo v náboji kola. Druhým nejpoužívanějším typem motoru je taktéž střídavý asynchronní motor. Ze způsobů pohonu převažuje mezi současnými elektromobily náhon na přední nápravu, což je způsobeno tím, že výrazná část elektromobilů je v dnešní době vyráběna úpravou vozidel se spalovacími motory (například VW e-Golf, Ford Focus Electric, Kia Soul EV). Pohonom zadní nápravy nebo režimem 4x4 bývají vybaveny především původně koncipované elektromobily (Tesla model S, Peugeot i-On, Nissan Leaf), díky čemuž mají nízké těžiště a tím i lepší jízdní vlastnosti. Zmínil jsem se též o systémech pro uskladnění energie, v historických i současných elektromobilech slouží většinou jako zásobárna energie akumulátor, nejčastěji na bázi lithia. Další systémy, jako superkapacity nebo palivové články jsou zatím stále ve stádiu vývoje a v praxi se příliš nepoužívají.

Dále jsem představil typ a parametry elektromobilu, jež jsem měl v plánu simulovat, a postup tvorby jeho modelu. Zde bylo nutné dohledat z příruček a internetu všechny parametry potřebné k simulaci a poté postupně vybudovat simulační prostředí od jednoduššího ke složitějšímu. Začal jsem elektrickým a mechanickým modelem stejnosměrného motoru, poté jsem dále pokračoval od regulátorů proudu a napětí přes model baterie a simulaci jízdních odporů až po regulátor rychlosti. S tím také souvisela problematika jízdních cyklů, které budou k simulování použity. Vybral jsem sedm jízdních cyklů, vzhledem k povaze vozidla pouze městské a mimoměstské, nikoli dálniční. Tyto cykly jsem převedl do tabulky, případně nepatrně zjednodušil, a vytvořil blok s funkcí virtuálního řidiče, který obsahoval průběh žádané rychlosti na čas.

V poslední části jsem se zaměřil na měření elektrických a mechanických veličin a průběhů při průjezdu modelu elektromobilu jízdními cykly. Tyto výsledky jsem pak následně porovnal v tabulce. Měřené veličiny byly například rychlost, proudy kotvou i buzením, hnací, dynamické a zátěžné síly, mechanické výkony, elektrické příkony, účinnost nebo teplotu a stav nabití

akumulátoru. Výsledky potvrdily předpoklad, že tento typ elektromobilu je kvůli své větší výšce a horší aerodynamice vhodný hlavně pro městský a příměstský provoz, kde se doprava pohybuje nižší rychlostí. Městský provoz je pro tento typ vozu vhodný také proto, že se při něm výrazně uplatní rekuperace. V městských jízdách vrátilo do akumulátoru až třetina energie, která by se u vozů se spalovacím motorem bez užitku zmařila na teplo v brzdách. V mimoměstských jízdách, kde se elektromobil pohyboval rovnoměrněji a méně často zpomaloval, se podíl rekuperace pohyboval v rozmezí 5 až 20 %. Podrobnější výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 4.2.

Neméně významnou část této práce tvořilo i porovnání modelu elektromobilu se skutečným elektromobilem. To se odehrálo pomocí krátké zkušební jízdy, která byla následně simulována. Porovnání výsledků trochu komplikovaly zvlněné průběhy naměřené během zkušební jízdy a možné zvýšené tření zatuhlých ložisek po delším stání vozidla, ale i tak bylo patrné, že průběhy reálného vozu i simulovaného modelu korespondují. Více by prozradilo další měření na skutečném autě, model elektromobilu je na to připravený. Pokud by se v budoucnu podařilo naměřit více průběhů ze skutečného vozu, na tomto modelu by se daly proměřit také a porovnat výsledky. Na základě porovnání by pak šlo model dále vylepšovat a zpřesňovat.

Zdroje

- [1] VOŽENÍLEK, P. — NOVOTNÝ, V. — MINDL, P.: Elektromechanické měniče. 2.vyd. ČVUT Praha 2011. ISBN 978-80-01-04875-7
- [2] PAVELKA, J. — ZDENĚK, J.: Elektrické pohony a jejich řízení. 1.vyd. ČVUT Praha 2010. ISBN 978-80-01-04642-5
- [3] L' Institut Citroën: Berlingo Electrique
- [4] WIKIPEDIA: Electric Car. [online] [Cit. 3.5.2016] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car
- [5] WIKIPEDIA: List of production battery electric vehicles. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_production_battery_electric_vehicles
- [6] WIKIPEDIA: List of electric cars currently available. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_electric_cars_currently_available
- [7] KANDI TECHNOLOGIES: KD-5010. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://en.kandivehicle.com/ProductDetail.aspx?kid=23>
- [8] WIKIPEDIA: BMW i3. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/BMW_i3
- [9] BMW Czech Republic: Ceník. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://www.bmw.cz/cz/cs/newvehicles/_shared/pdf/pricelist/I01_03-2015.pdf?download=true
- [10] WIKIPEDIA: Ford Focus Electric. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Focus_Electric
- [11] FORD MOTOR COMPANY: 2015 Focus Electric . [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://www.ford.com/cars/focus/trim/electric/>
- [12] CARANDDRIVER: Ford Focus Electric. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/ford/focus-electric>
- [13] CARANDDRIVER: Volkswagen e-Golf. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/volkswagen/e-golf>
- [14] WIKIPEDIA: Volkswagen Golf Mk7. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_Golf_Mk7#e-Golf
- [15] WIKIPEDIA: BMW Brilliance. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/BMW_Brilliance#Electric_drive
- [16] WIKIPEDIA: Kia Soul EV. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Kia_Soul_EV
- [17] KIA EUROPE: The new Kia Soul EV. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://www.kia.com/eu/campaigns-and-redirects/soul-ev/>
- [18] EDMUNDS: Toyota RAV4 EV Review. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://www.edmunds.com/toyota/rav4-ev/>
- [19] WIKIPEDIA: Bolloré Bluecar. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bollor%C3%A9_Bluecar
- [20] GROUPE BOLLORÉ: Bluecar. [online] [Cit. 3.5.2015] Dostupné z: <http://www.bluecar.fr/>
- [21] KUNOVSKÝ, Martin. 2009. Modelování pohonu s DC motorem v prostředí MATLAB/Simulink [online]. Brno [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17932. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Hubík.

- [22] LARMINIE, J. — LOWRY, J.: Electric vehicle technology explained. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2012. ISBN 978-1-119-94273-3.
- [23] GRAJA, M.: Základy dynamiky pohybu vozidel. [online]. 2011 [cit. 14.3.2016]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:L0ooy1I8Bl4J:www.primat.cz/moje-materialy/detail/79466%3FseoId%3Dupce-dfjp%26do%3Ddownload+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [24] Tíhové zrychlení. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 10. 2. 2016 [cit. 15.3.2016]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C3%ADhov%C3%A9_zrychlen%C3%AD
- [25] MODEL S TESLA MOTORS. [online] [Cit. 3.5.2016] Dostupné z: <https://www.teslamotors.com/models>
- [26] WIKIPEDIA: Brushless DC electric motor. [online] [Cit. 3.5.2016] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
- [27] WIKIPEDIA: Supercapacitor. [online] [Cit. 3.5.2016] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#Current_load_and_cycle_stability
- [28] WIKIPEDIA: Palivový článek. [online] [Cit. 3.5.2016] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek
- [29] DieselNet.com: Emission Test Cycles, ECE15+EUDC/NEDC. [online] [Cit. 13.5.2016] Dostupné z: https://www.dieselnets.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- [30] DieselNet.com: Emission Test Cycles, Common Artemis Driving Cycles. [online] [Cit. 13.5.2016] Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/artemis.php>
- [31] DieselNet.com: Emission Test Cycles, EPA Highway Fuel Economy Test Cycle (HWFET). [online] [Cit. 13.5.2016] Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/hwfet.php>
- [32] Lithium Battery Model, Simscape Language and Simulink Design Optimization, Robyn Jackey [online]. The MathWorks, Inc. (2015) [Cit. 10.5.2016]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36019-lithium-battery-model--simscap-language-and-simulink-design-optimization>
- [33] WIKIPEDIA: Toyota Prius. [online] [Cit. 13.5.2016] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius
- [34] Electropedia: Battery and Energy Technologies, Nickel Cadmium Batteries. [online] [Cit. 13.5.2016] Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/nicad.htm>
- [35] Electropedia: Battery and Energy Technologies, Rechargeable Lithium Batteries. [online] [Cit. 13.5.2016] Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm>

Zdroje obrázků

- Obr. 1: https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSN2FTja7aDI3yhlkAjP4_biDFdDM6FdT5kDfjmOX2etDDHY6nE [cit. 2016-05-06]
- Obr. 2: <http://uptenlist.com/wp-content/uploads/2013/04/2.-ElBil-Norge-Buddy-Cab.jpg> [cit. 2015-05-06]
- Obr. 3: <http://www.carmagazine.co.uk/Images/upload/30994/images/11VWEUpCARreview.jpg> [cit. 2015-05-06]
- Obr. 4: <http://m1.at.f6m.fr/media/---gamme-fspp/vehicules-renault-ze/B10/phase1/att77a12e366ab642a3834722c9f0511d78/renault-ZOE-technique-01.JPG> [cit. 2015-05-06]
- Obr. 5: <http://www.nissanusa.com/vlp-assets/media/vehicles/2016/leaf/features/electricity-efficiency/2016-nissan-leaf-white-side-profile.jpg> [cit. 2016-05-06]
- Obr. 6: <http://cdn.bimmertoday.de/wp-content/uploads/Zinoro-1E-BMW-X1-China-Elektro-SUV-Guangzhou-2013-01.jpg> [cit. 2015-05-06]
- Obr. 7: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Tesla_Roadster_Japanese_display.jpg [cit. 2015-05-06]
- Obr. 8: http://cdn7.triplepundit.com/wp-content/uploads/2011/02/eStar_5_RGB_300x203.jpg [cit. 2015-05-06]
- Obr. 9: <http://www.carbodypanels4u.co.uk/media/catalog/category/VEH227.jpg> [cit. 2015-05-06]
- Obr. 10: L' Institut Citroën: Berlingo Electrique
- Obr. 11: L' Institut Citroën: Berlingo Electrique
- Obr. 12: L' Institut Citroën: Berlingo Electrique
- Obr. 13: Individuální projekt A1M14IND, Bc. Pavel Skarolek, Návrh a realizace modulu řízení motoru pro Citroën Berlingo Electrique, 2016
- Obr. 14: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
- Obr. 15: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
- Obr. 16: DieselNet.com: Emission Test Cycles, ECE15+EUDC/NEDC. [online] [Cit. 13.5.2016]
Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- Obr. 17: DieselNet.com: Emission Test Cycles, ECE15+EUDC/NEDC. [online] [Cit. 13.5.2016]
Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- Obr. 18: DieselNet.com: Emission Test Cycles, ECE15+EUDC/NEDC. [online] [Cit. 13.5.2016]
Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- Obr. 19: DieselNet.com: Emission Test Cycles, Common Artemis Driving Cycles. [online] [Cit. 13.5.2016]
Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/artemis.php>
- Obr. 20: DieselNet.com: Emission Test Cycles, Common Artemis Driving Cycles. [online] [Cit. 13.5.2016]
Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/artemis.php>
- Obr. 21: vlastní, autor Martin Bína
- Obr. 22: DieselNet.com: Emission Test Cycles, EPA Highway Fuel Economy Test Cycle (HWFET). [online] [Cit. 13.5.2016]
Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/hwfet.php>
- Obr. 23: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b

Obr. 24: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 25: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 26: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 27: Individuální projekt A1M14IND, Bc. Pavel Skarolek, Návrh a realizace modulu řízení motoru pro Citroën Berlingo Electric, 2016
Obr. 28: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 29: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 30: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 31: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 32: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 33: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 34: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 35: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 36: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 37: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 38: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 39: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 40: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 41: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 42: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 43: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 44: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 45: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 46: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 47: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 48: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 49: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 50: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 51: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 52: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 53: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 54: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 55: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 56: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 57: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 58: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b
Obr. 59: vlastní, vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink R2014b

Struktura přiloženého CD

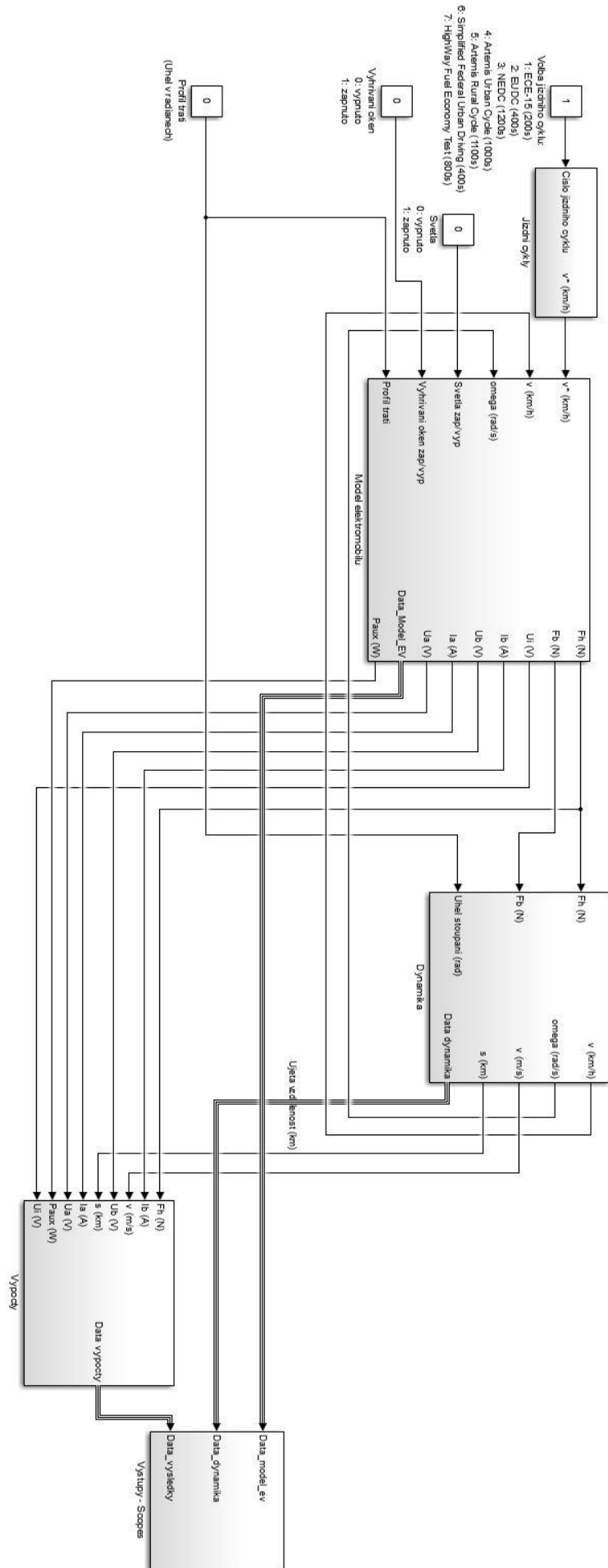
Diplomová práce		Diplomová práce ve formátu pdf
Simulační model		Simulovaný model elektromobilu
Naměřená data	ECE-15	Průběhy naměřené v jízdním cyklu ECE-15
	EUDC	Průběhy naměřené v jízdním cyklu EDUC
	NEDC	Průběhy naměřené v jízdním cyklu NEDC
	Artemis Urban	Průběhy naměřené v jízdním cyklu Artemis Urban
	Artemis Rural	Průběhy naměřené v jízdním cyklu Artemis Rural
	SFUD	Průběhy naměřené v jízdním cyklu SFUD
	HWFET	Průběhy naměřené v jízdním cyklu HWFET
	Berlingo	Průběhy naměřené simulací jízdy reálného vozu

Přílohy

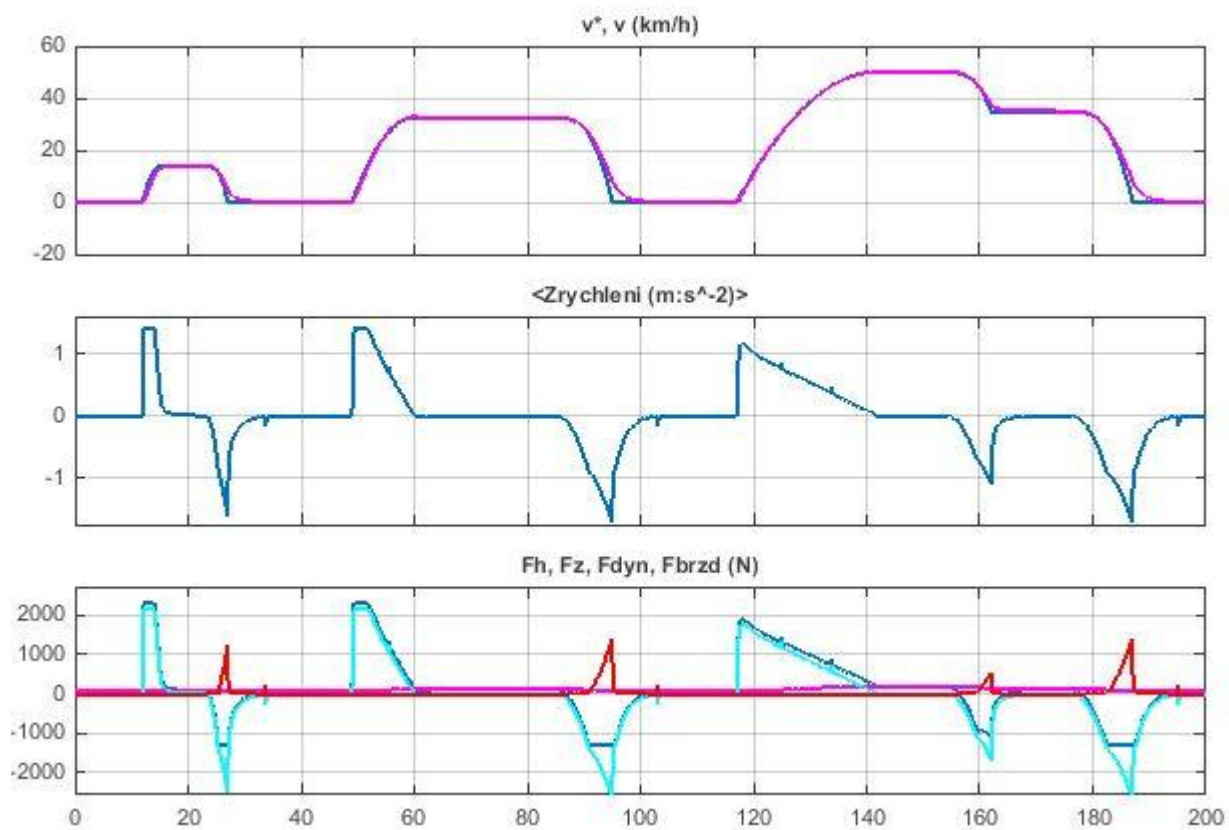
Příloha 1 Celý model elektromobilu.....	79
Příloha 2 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu ECE-15	80
Příloha 3 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu ECE-15	80
Příloha 4 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu ECE-15	81
Příloha 5 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu EUDC.....	82
Příloha 6 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu EUDC.....	82
Příloha 7 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu EUDC.....	83
Příloha 8 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu NEDC.....	84
Příloha 9 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu NEDC.....	84
Příloha 10 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu NEDC.....	85
Příloha 11 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu Artemis Urban.....	86
Příloha 12 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu Artemis Urban.....	86
Příloha 13 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu Artemis Urban.....	87
Příloha 14 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu Artemis Rural	88
Příloha 15 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu Artemis Rural	88
Příloha 16 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu Artemis Rural	89
Příloha 17 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu SFUD.....	90
Příloha 18 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu SFUD.....	90
Příloha 19 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu SFUD.....	91
Příloha 20 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu HWFET	92
Příloha 21 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu HWFET	92
Příloha 22 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu HWFET	93

Tabulka 13 Použité symboly

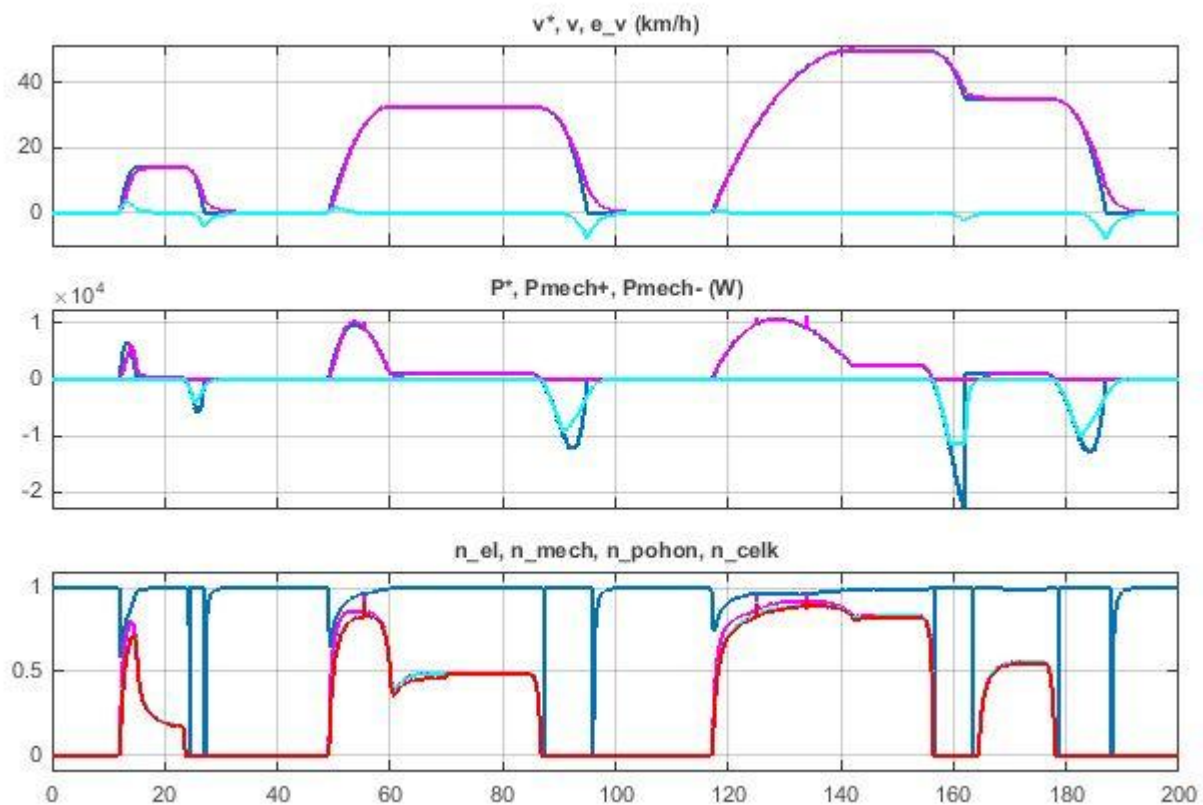
v^*	žádaná rychlost	km/h
v	skutečná rychlost	km/h
e_v	regulační odchylka rychlosti	km/h
bat SOC	stav nabití baterie	-
bat Temp	teplota baterie	°C
I_a^*	žádaný proud kotvou	A
I_a	skutečný proud kotvou	A
P^*	žádaný mechanický výkon	W
P_{mech+}	dodávaný mechanický výkon	W
P_{mech-}	rekuperační mechanický výkon	W
n_{el}	elektrická účinnost	-
n_{mech}	mechanická účinnost	-
n_{pohon}	účinnost pohonu	-
n_{celk}	celková účinnost vozidla	-
a	zrychlení	m/s^2
F_h	hnací síla	N
F_z	zátěžná síla	N
F_{dyn}	dynamická síla	N
F_{brzd}	brzdná síla	N



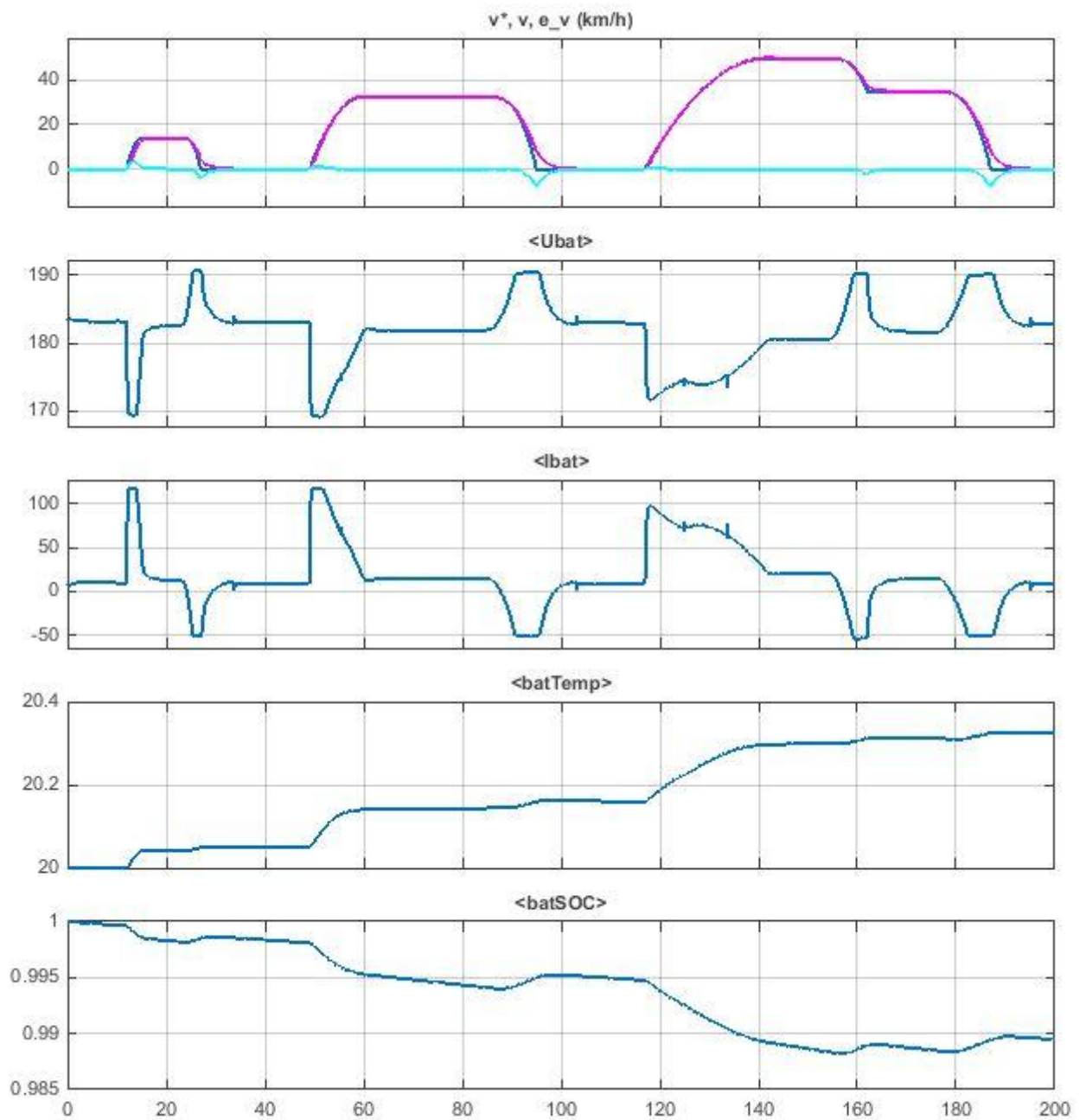
Příloha 1 Celý model elektromobilu



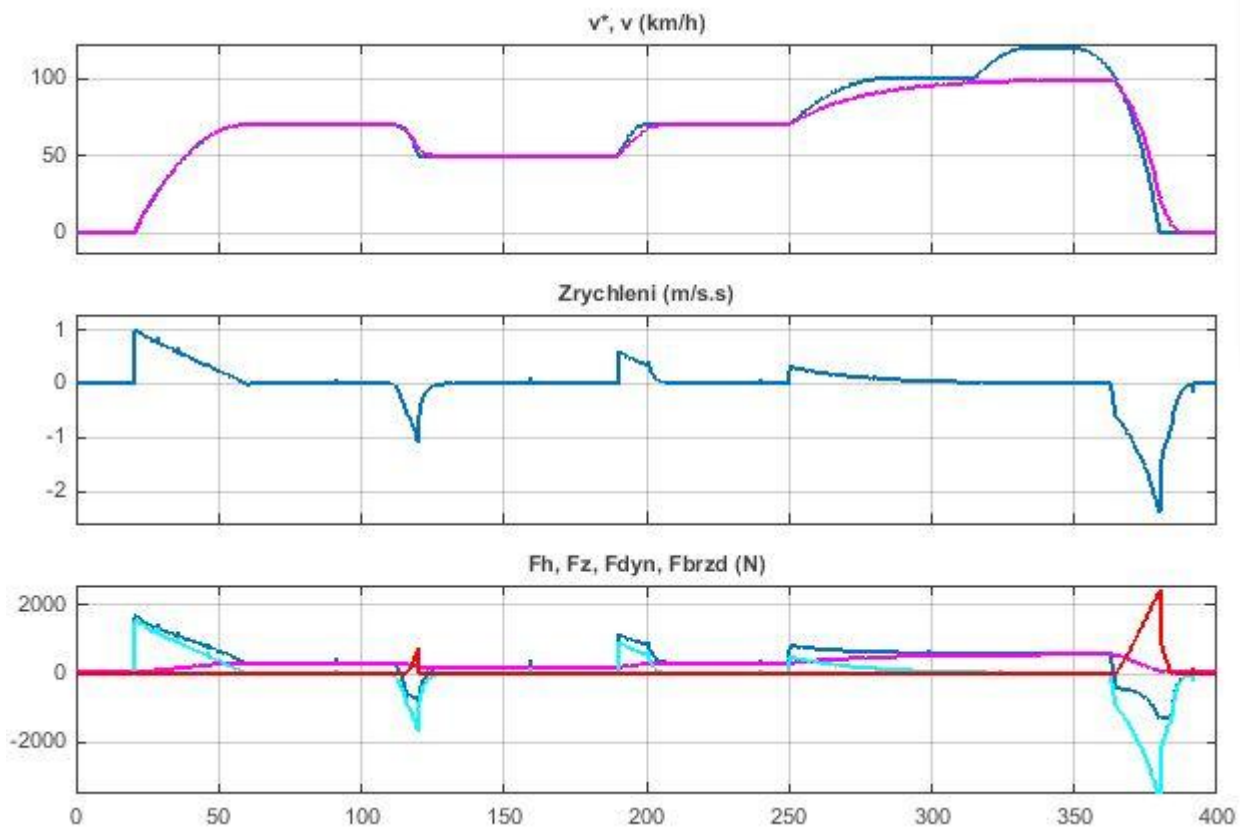
Příloha 2 Průběhy rychlosti, zrychlení a sil jízdního cyklu ECE-15



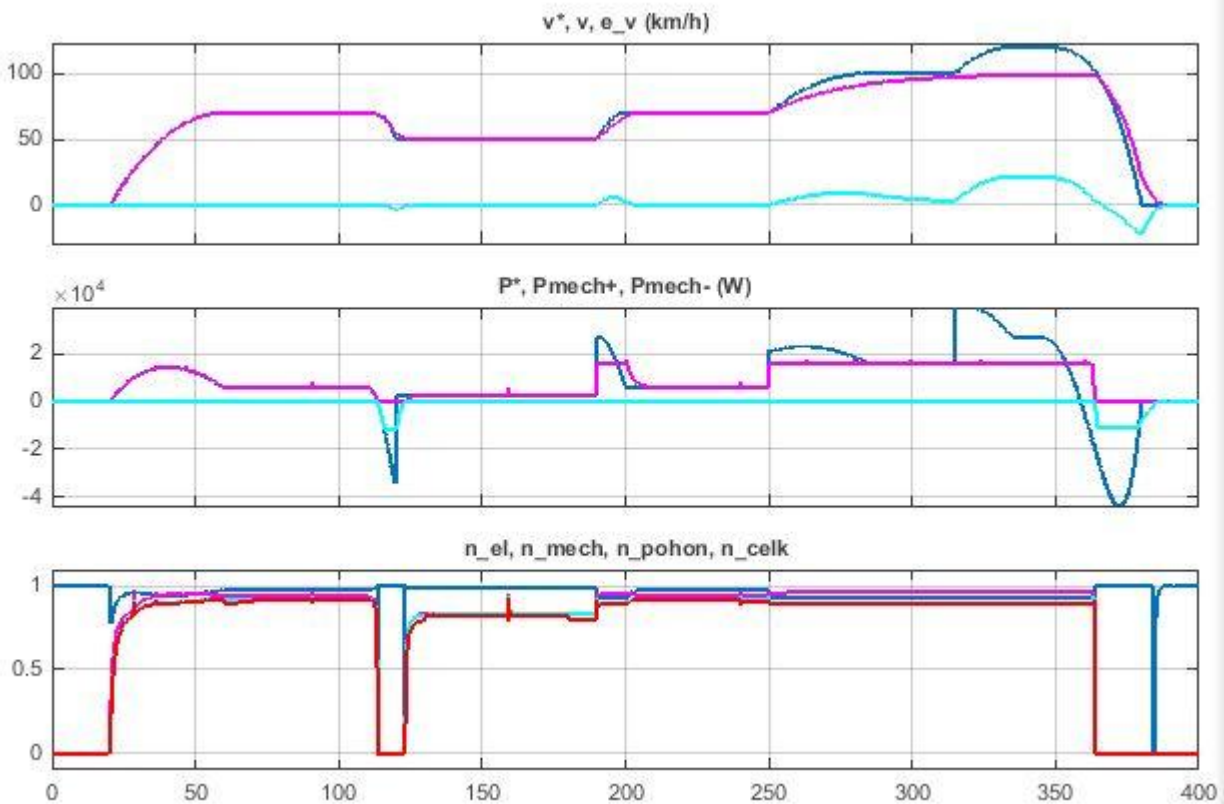
Příloha 3 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu ECE-15



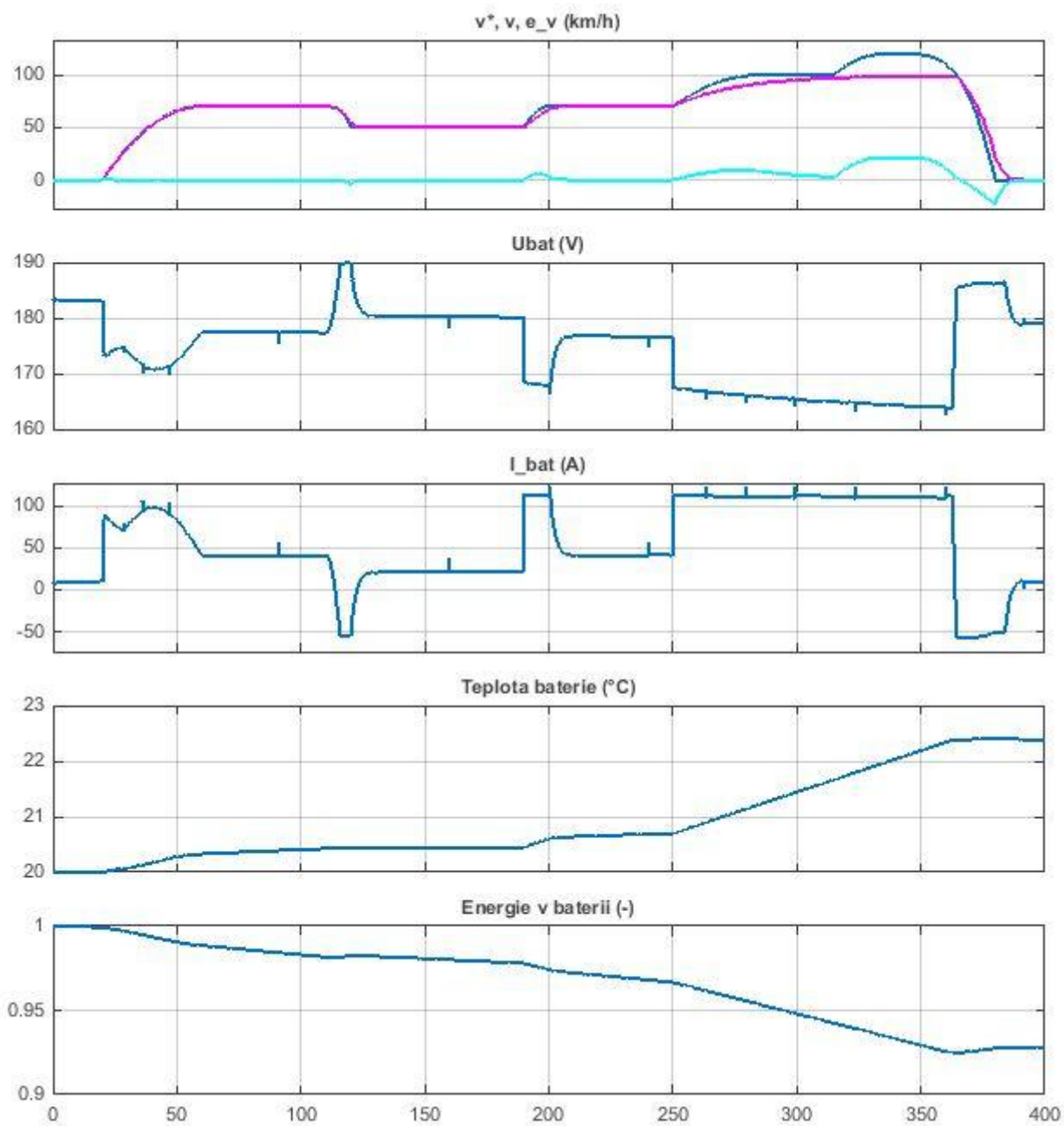
Příloha 4 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu ECE-15



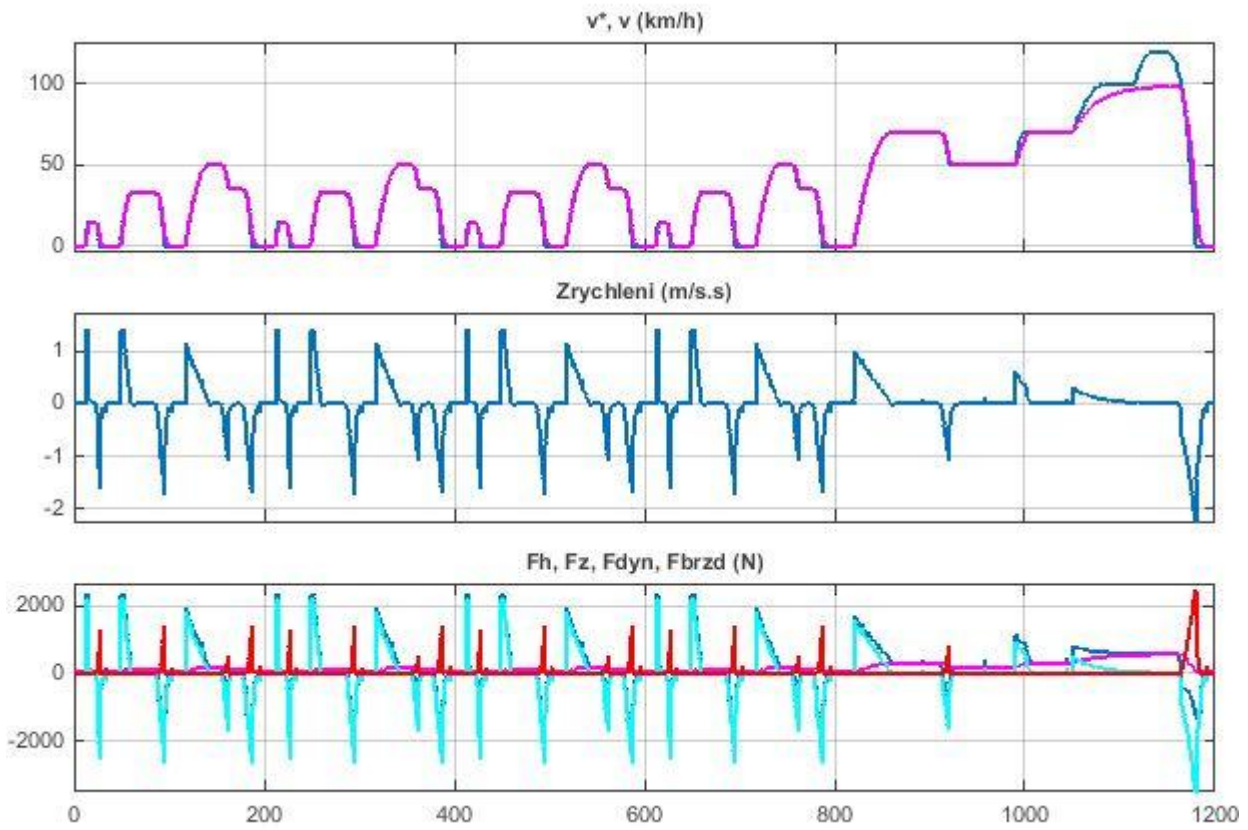
Příloha 5 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu EUDC



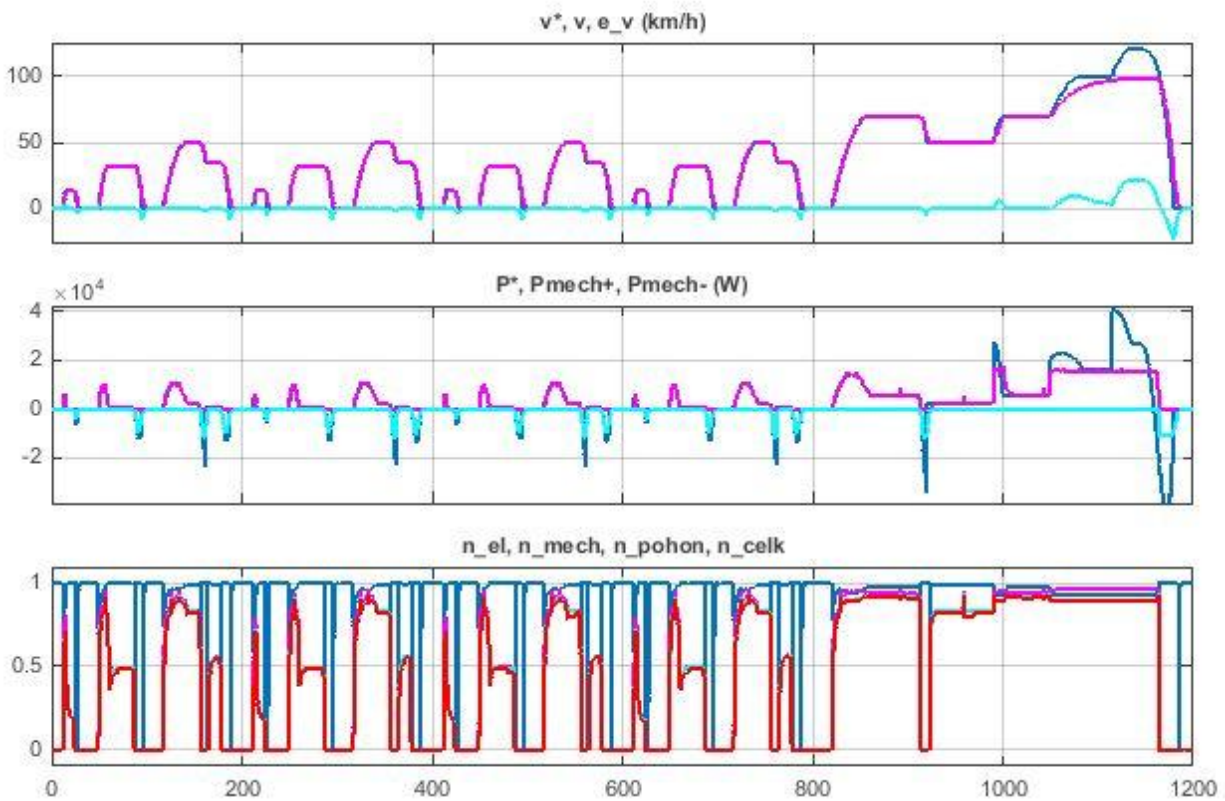
Příloha 6 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu EUDC



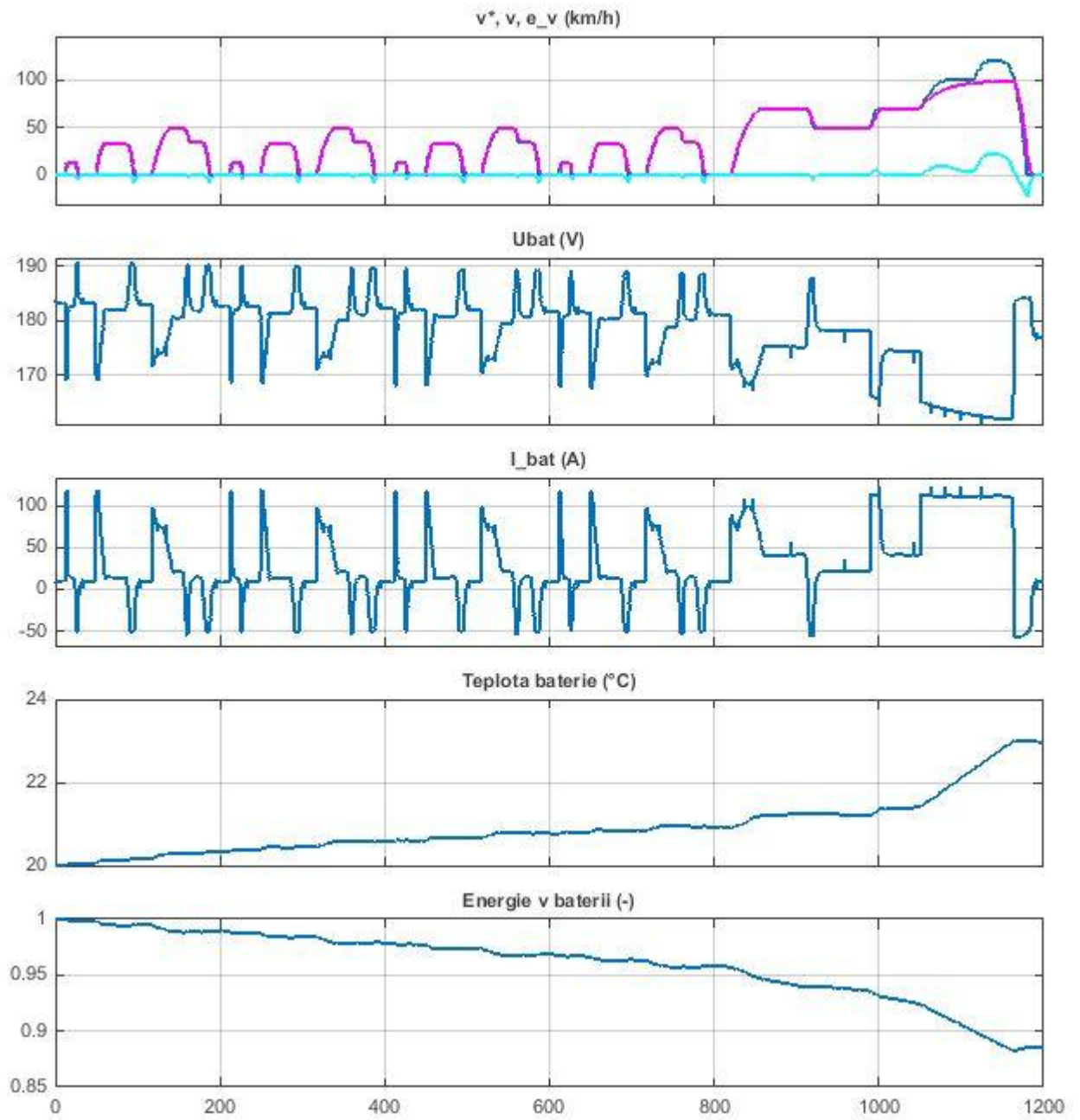
Příloha 7 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu EUDC



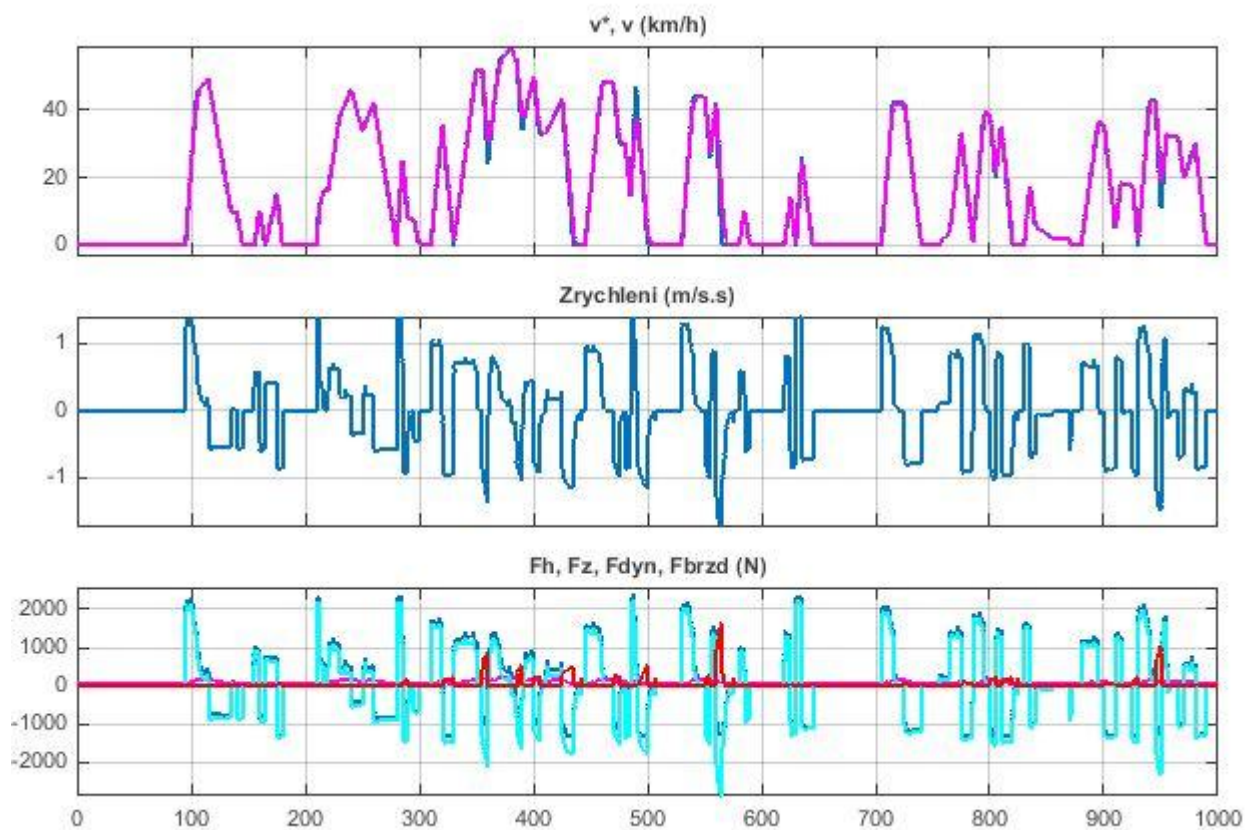
Příloha 8 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu NEDC



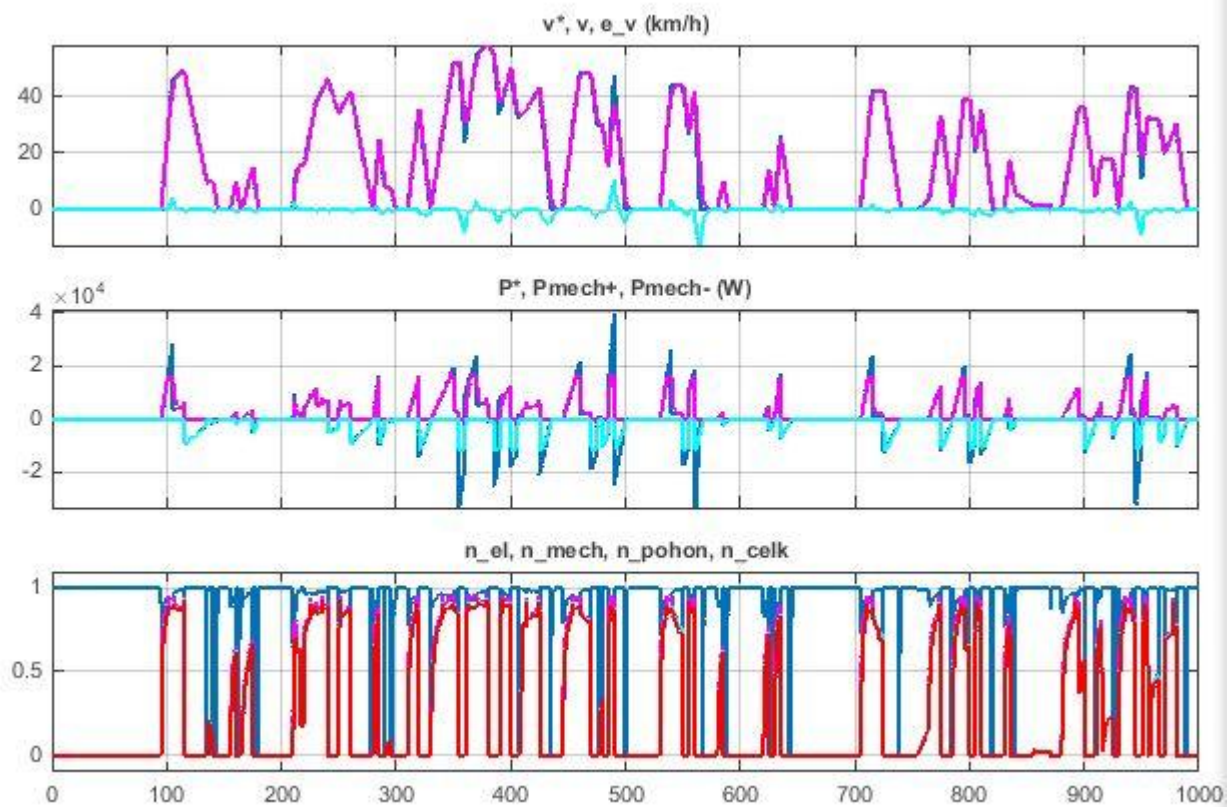
Příloha 9 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu NEDC



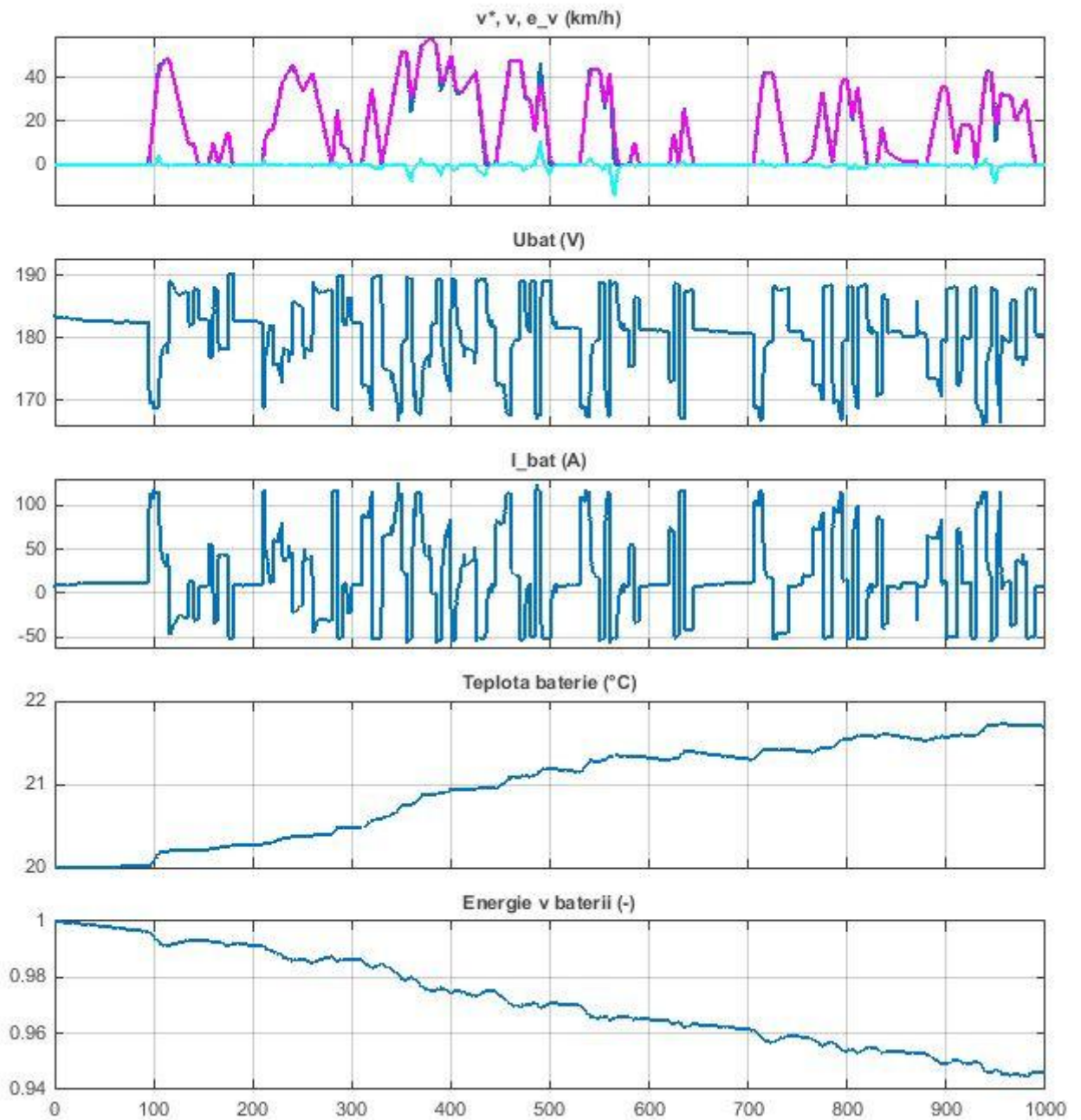
Příloha 10 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu NEDC



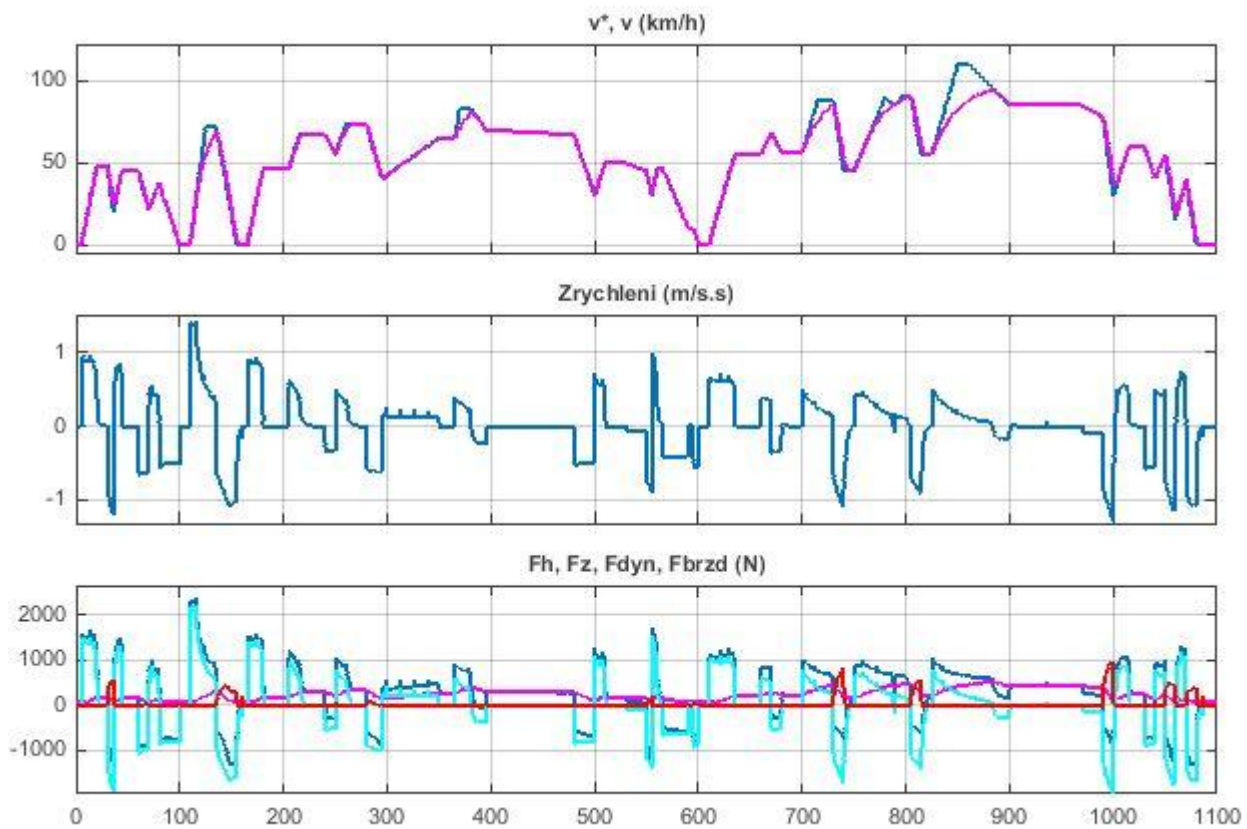
Příloha 11 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu Artemis Urban



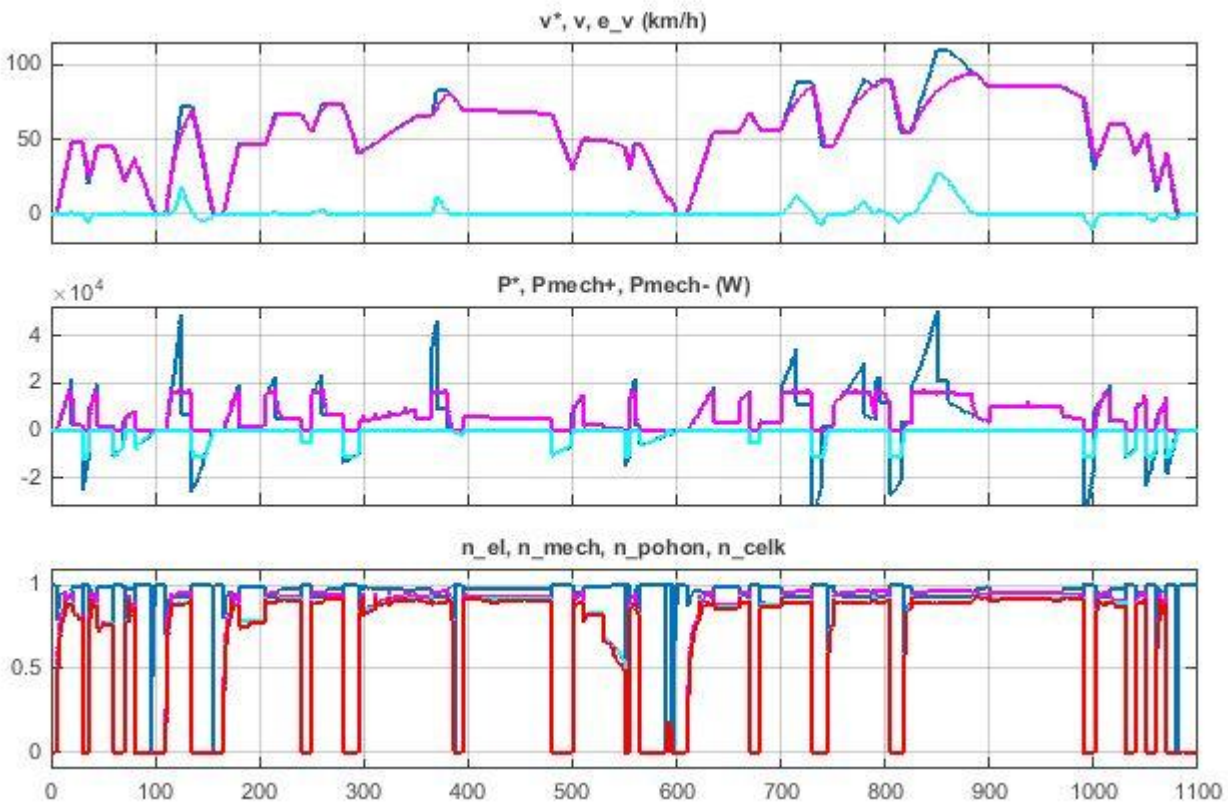
Příloha 12 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu Artemis Urban



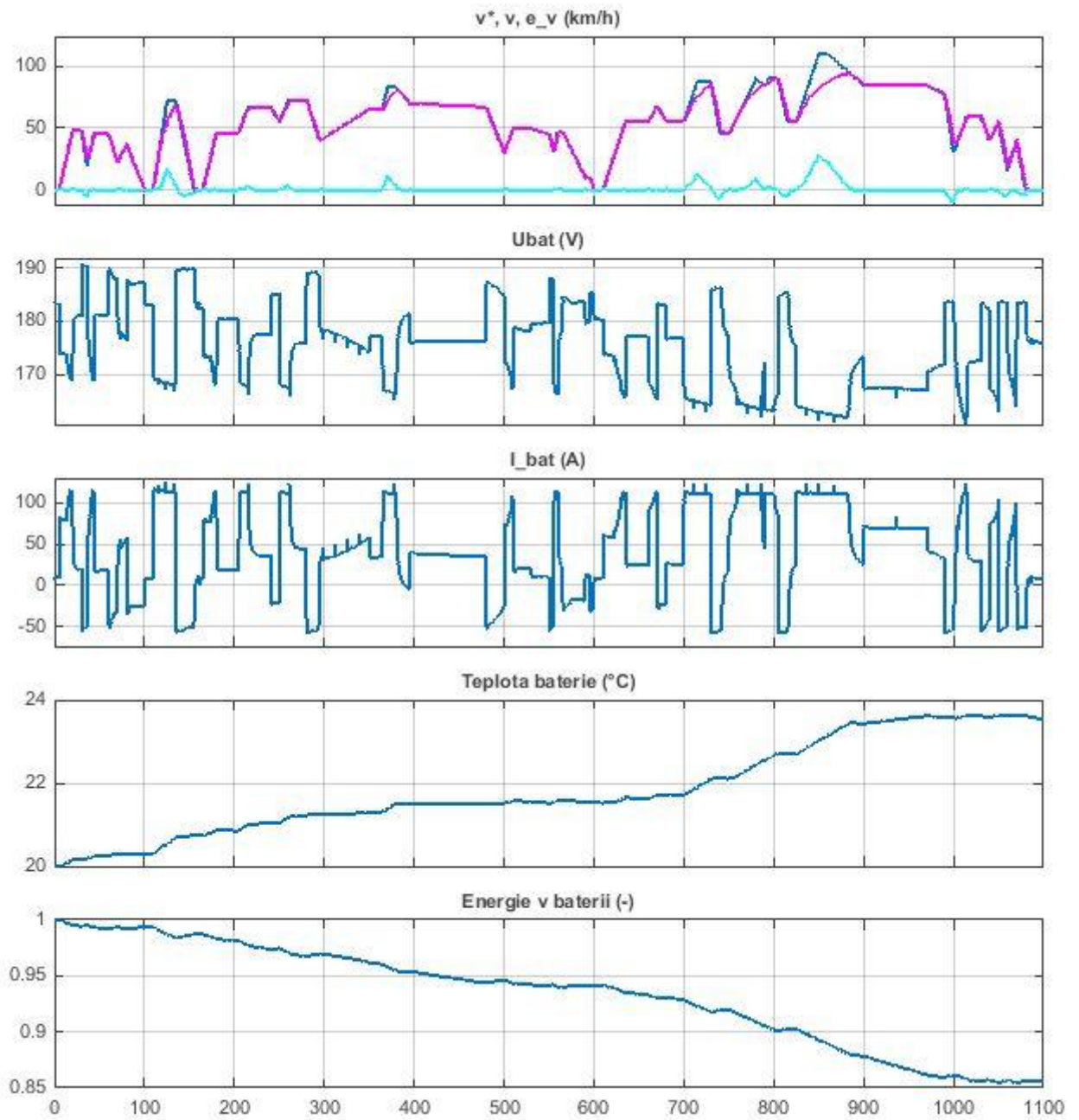
Příloha 13 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu Artemis Urban



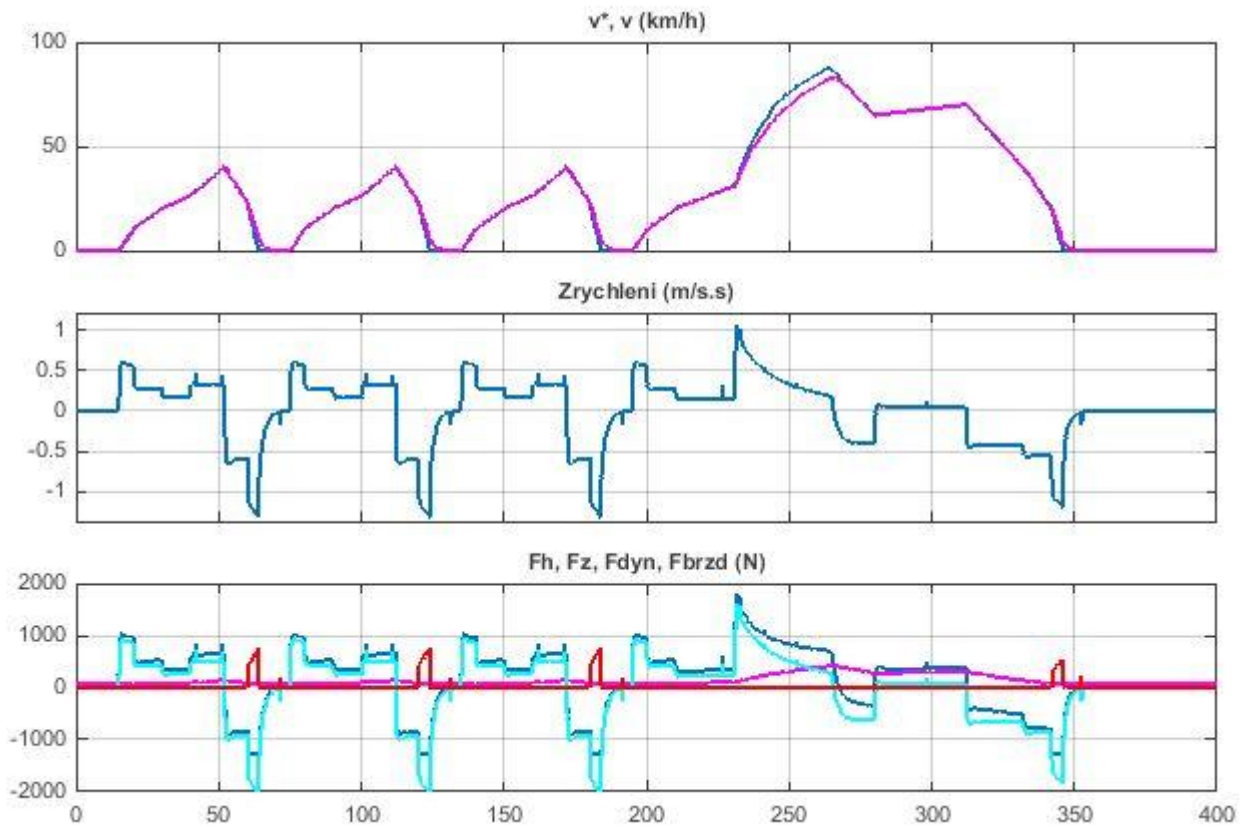
Příloha 14 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu Artemis Rural



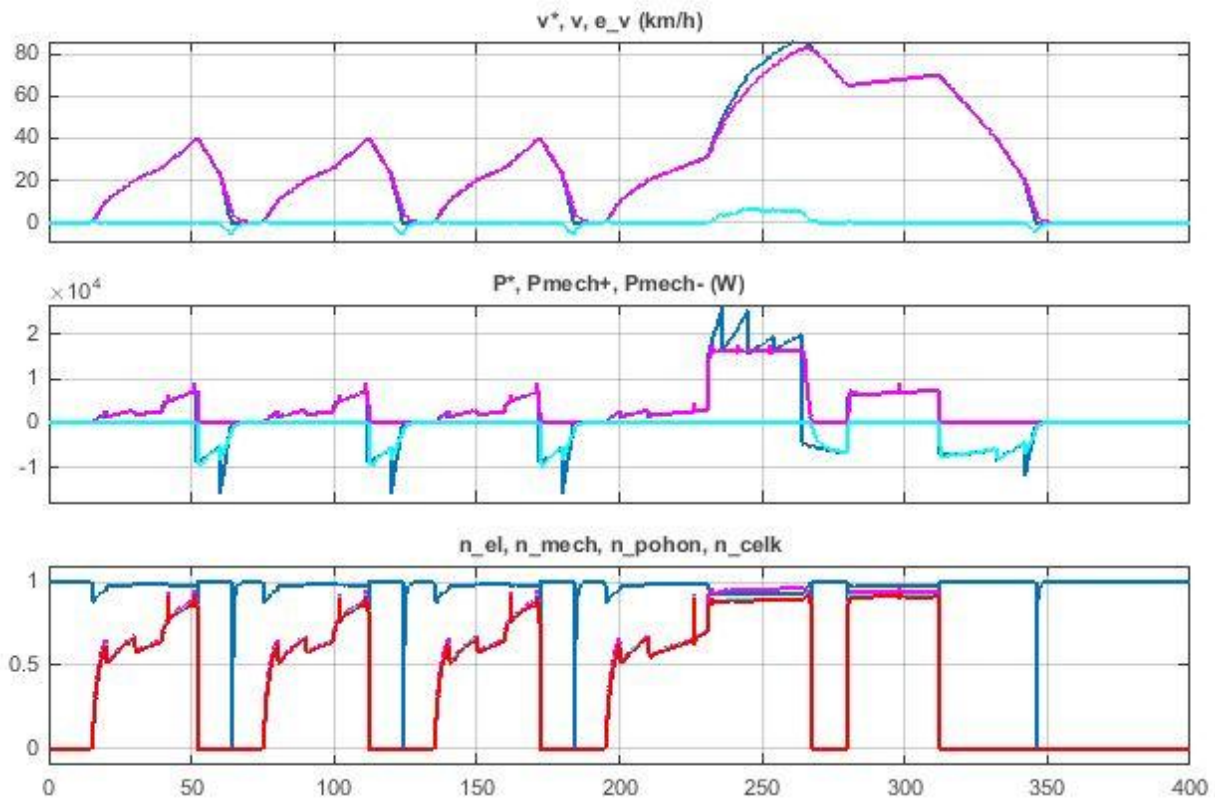
Příloha 15 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu Artemis Rural



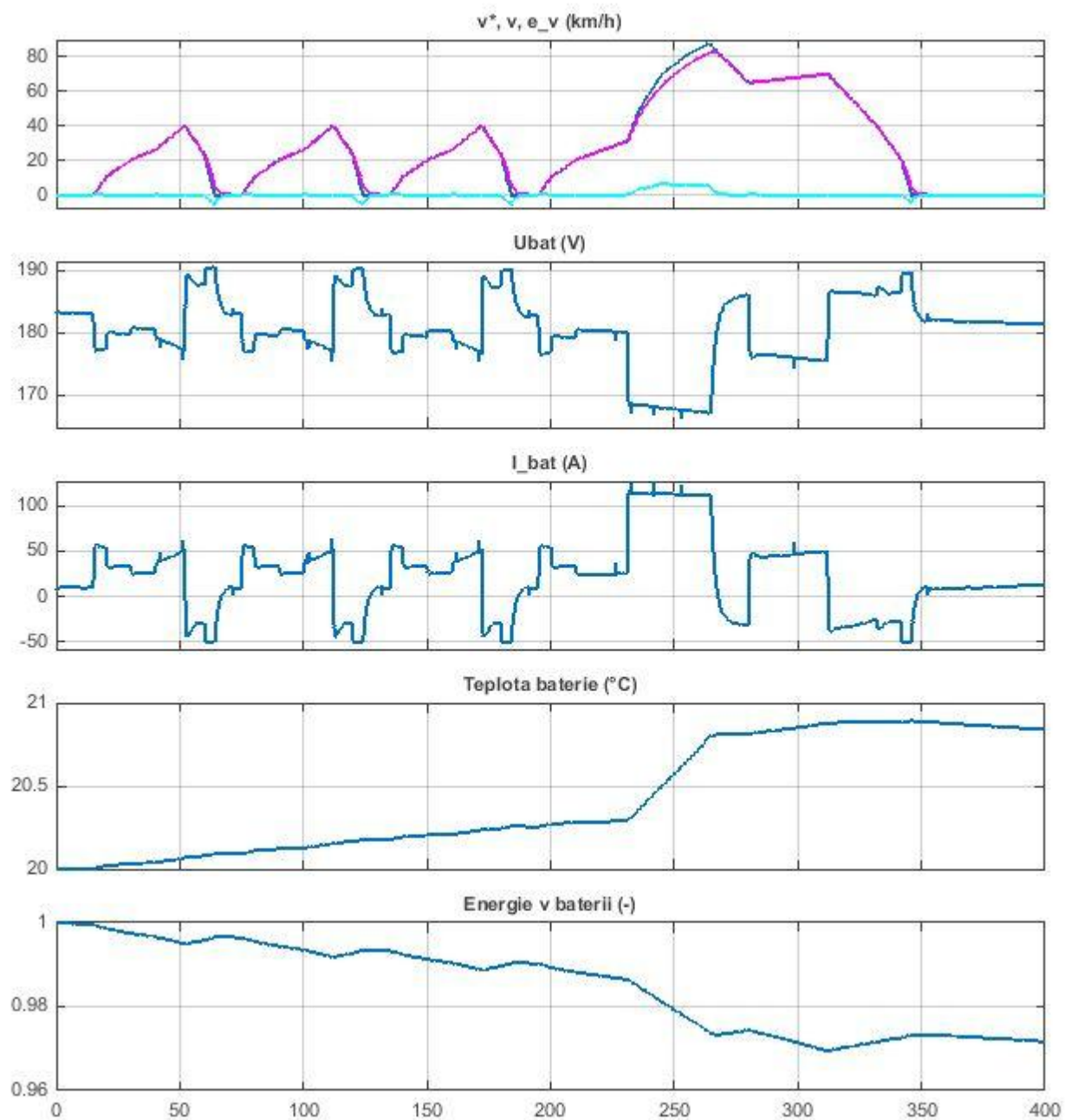
Příloha 16 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu Artemis Rural



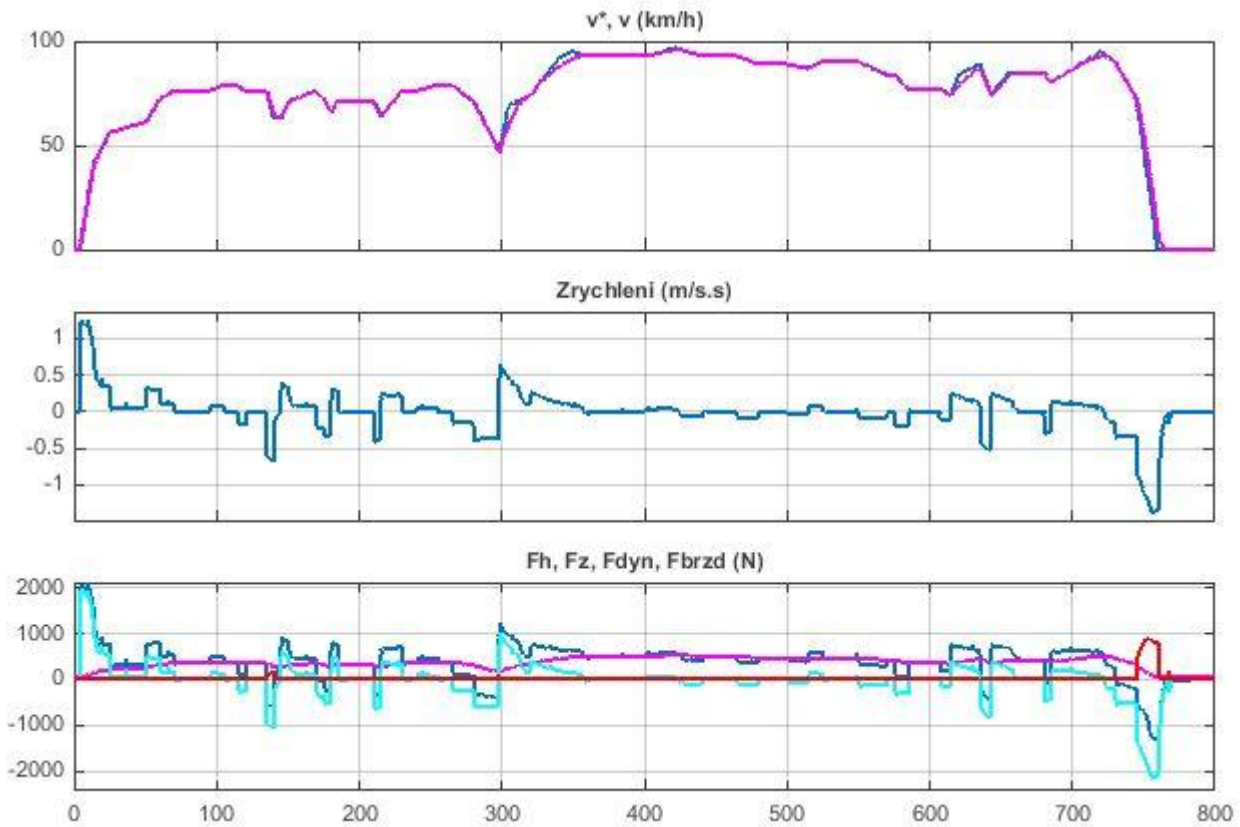
Příloha 17 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu SFUD



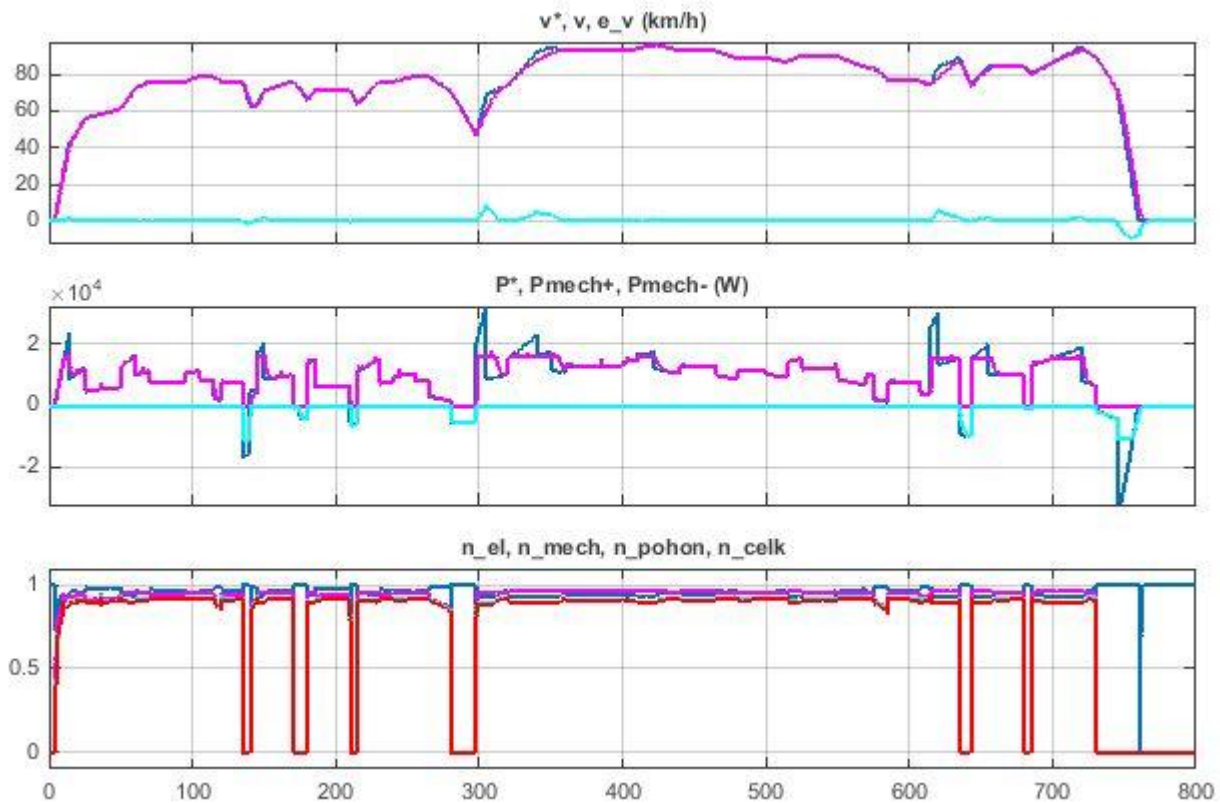
Příloha 18 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu SFUD



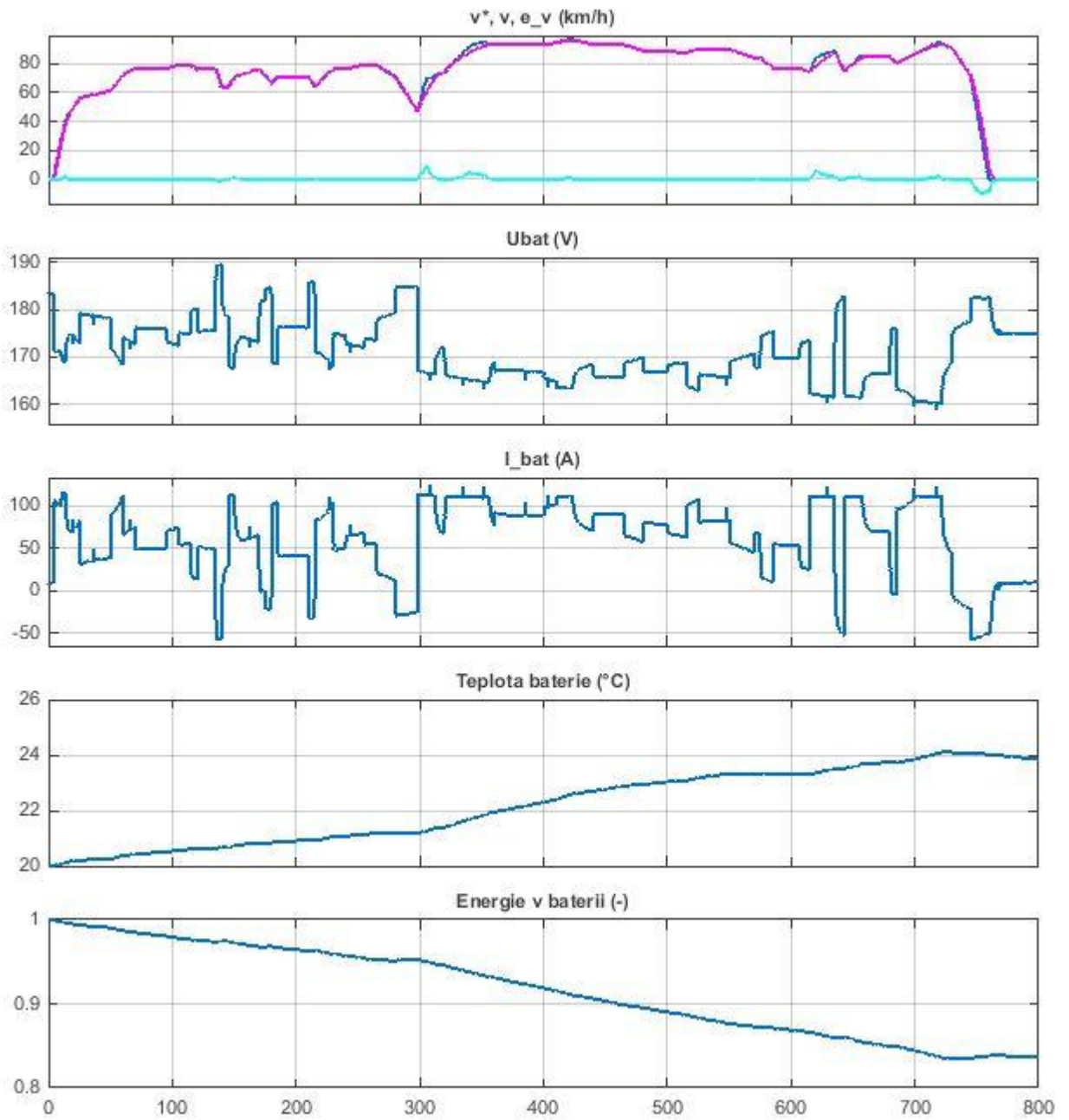
Příloha 19 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu SFUD



Příloha 20 Průběhy rychlostí, zrychlení a sil jízdního cyklu HWFET



Příloha 21 Rychlost, výkony a účinnost jízdního cyklu HWFET



Příloha 22 Parametry akumulátoru v jízdním cyklu HWFET