

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Simulační model spotřeby el. energie parciálního trolejbusu

Diplomová práce

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Horák**  
Osobní číslo: **D23518**  
Studijní program: **N0788A040001 Dopravní technika**  
Specializace: **Elektrická trakce a elektromobilita**  
Téma práce: **Simulační model spotřeby el. energie parciálního trolejbusu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

## Zásady pro vypracování

Vytvořte matematický model pro výpočet spotřeby el. energie parciálního trolejbusu na konkrétní lince MHD. Model by měl poskytovat přehled o výkonových a energetických tocích uvnitř vozidla během jízdy a poskytovat energetickou bilanci na konci jízdy. Využijte data naměřená na reálném vozidle v pravidelném provozu v různých obdobích roku. Porovnejte výsledky z modelu s naměřenými hodnotami z reálného provozu. Dílčím úkolem bude sestavení datového popisu jízdní trasy, po které se vozidlo pohybuje. Model realizujte v programu Matlab.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] MAŠEK, Zdeněk a ZÁVODNÍK, Michal. BEV Energy Consumption Estimation for Route Planning. In: *2023 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, EDPE 2023*. New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2023, s. 1-9. ISBN 979-835032275-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EDPE58625.2023.10274041>.
- [2] JAN, Dedek. Návrh algoritmů výpočtu dojezdu a optimalizace řízení toku energií pro elektrická vozidla. Disertační práce. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2022.
- [3] Podklady poskytnuté vedoucím práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Mašek, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2024**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. června 2025**

L.S.

---

**doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Vítězslav Krčmář, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. května 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Simulační model spotřeby el. energie parciálního trolejbusu jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 4.7.2025

Jakub Horák v.r.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Zdeňkovi Maškovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, podnětné rady, vstřícnost, trpělivost a všestrannou pomoc při tvorbě této práce. Velké poděkování patří mé manželce, která mi byla celé studium největší oporou v nejtěžších momentech, rodině, spolužákům a blízkým přátelům za jejich podporu a pochopení.

## **ANOTACE**

Tato práce se zabývá vytvořením simulačního modelu spotřeby elektrické energie parciálního trolejbusu. Model je implementován v prostředí MATLAB pomocí objektově orientovaného programování a umožňuje analyzovat energetické toky vozidla při jízdě pod trolejovým vedením i na baterii na předem definované trase. Simulace zohledňuje parametry vozidla, topografii trasy a rychlostní limity trasy. Vypracovaný model byl ověřen porovnáním výsledků simulace s reálnou jízdou trolejbusu a může sloužit k hodnocení efektivity provozu parciálních trolejbusů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

simulační, model, spotřeba, energie, parciální, trolejbus, Škoda-Solaris, trakční, baterie, sběrač, rekuperace, MATLAB, testování

## **TITLE**

Energy consumption model of battery-assisted trolleybus.

## **ANNOTATION**

This thesis focuses on the creation of a simulation model of electric energy consumption of battery-assisted trolleybus. The model is implemented in the MATLAB environment using object-oriented programming and allows analysis of energy flows within the vehicle while operating under trolley wires and on battery power along a predefined route. The simulation incorporates vehicle parameters, route topography, and speed limits. The developed model has been verified by comparing simulation results with real trolleybus operation and can be used to evaluate the operational efficiency of partial trolleybuses.

## **KEYWORDS**

simulation, model, consumption, energy, partial, trolleybus, Škoda-Solaris, traction, battery, collector, recuperation, MATLAB, testing

# OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ, TABULEK A GRAFŮ .....	9
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK .....	12
ÚVOD .....	13
1. VOZIDLO A TRASA .....	15
1.1. Škoda-Solaris 24m .....	15
1.2. Trasa .....	17
2. SIMULAČNÍ MODEL .....	21
2.1. Technické předpoklady pro model .....	21
2.1.1. Blokové schéma a energetické toky ve vozidle .....	21
2.1.2. Parametrizace trasy pro model .....	25
2.1.3. Závislosti průměrných příkonů jednotlivých pomocných pohonů na venkovní teplotě .....	28
2.2. Program simulačního modelu .....	32
2.2.1. Vozidlo.m a ParametryVozidla.m .....	36
2.2.2. Trasy.m .....	39
2.2.3. JizdniOdpor.m .....	41
2.2.4. Prevodovka.m .....	44
2.2.5. Motor.m .....	47
2.2.6. A100_AUX.m .....	51
2.2.7. Baterie.m .....	54
2.2.8. BrzdovyOdpornik.m .....	58
2.2.9. Sberac.m .....	60
2.2.10. ModelVozidla.m .....	62
2.2.11. Simulace.m .....	78
3. VÝSLEDKY SIMULAČNÍHO MODELU .....	96
3.1. Režim Profil .....	96

3.1.1. Shrnutí režimu Profil .....	96
3.1.2. Výsledky simulace režimu Profil.....	97
3.2. Režim Dynamický .....	100
3.2.1. Shrnutí režimu Dynamický .....	100
3.2.2. Výsledky simulace režimu Dynamický .....	102
3.3. Porovnání režimů Profil a Dynamický .....	103
3.4. Vliv parametrů vozidla na výsledky simulací.....	108
3.4.1. Vliv obsazenosti vozidla na spotřebu energie.....	108
3.4.2. Vliv časového kroku simulace v dynamickém režimu .....	109
3.4.3. Vliv větší a menší akcelerace/decelerace na spotřebu energie a jízdní dobu .....	111
ZÁVĚR .....	113
POUŽITÁ LITERATURA .....	116
SEZNAM PŘÍLOH.....	118

## SEZNAM ILUSTRACÍ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázek 1 - Škoda Solaris 24m [5].....	15
Obrázek 2 - Výškový profil trasy linky č. 59 MHD Praha .....	18
Obrázek 3 - Trasa linky č. 59 MHD Praha [12].....	18
Obrázek 4 – Navádění sběračů při jejich zvedání pomocí stříšek [12] .....	19
Obrázek 5 - Nabíjecí místa na konečné zastávce Letiště [12] .....	19
Obrázek 6 - Zjednodušené blokové schéma Škoda-Solaris 24m.....	22
Obrázek 7 - Energetické toky ve vozidle při napájení z troleje.....	23
Obrázek 8 - Energetické toky ve vozidle při napájení z trakční baterie .....	23
Obrázek 9 - Energetické toky při rekuperaci vozidla v situaci, kdy trakční baterie je schopna přijmout energii.....	24
Obrázek 10 - Energetické toky při rekuperaci vozidla v situaci, kdy trakční baterie není schopna přijmout energii.....	24
Obrázek 11 – “Backward facing” blokové schéma simulačního modelu.....	35
Obrázek 12 - Blokové schéma třídy JizdniOdpor .....	42
Obrázek 13 - Blokové schéma třídy Prevodovka .....	45
Obrázek 14 - Blokové schéma třídy Motor .....	48
Obrázek 15 - Účinnostní mapa motorického a generátorického režimu motoru.....	51
Obrázek 16 - Blokové schéma třídy A100_AUX.....	52
Obrázek 17 - Zadávání počáteční hodnoty SoC uživatelem.....	55
Obrázek 18 - Blokové schéma třídy Baterie .....	56
Obrázek 19 - Blokové schéma třídy BrzdovyOdpornik .....	58
Obrázek 20 - Blokové schéma třídy Sberac.....	60
Obrázek 21 - Blokové schéma třídy ModelVozidla .....	63
Obrázek 22 - Výběr typu vozidla.....	64
Obrázek 23 - Zadání okolní teploty .....	65
Obrázek 24 - Zadání počátečního SoC .....	66
Obrázek 25 - Sledování rychlostního profilu modelem.....	67
Obrázek 26 - Výstupní proměnné funkce vypoctiEnergetickouBilanci() .....	77
Obrázek 27 - Blokové schéma třídy Simulace.....	79
Obrázek 28 - Tabulka logData pro ukládání hodnot z průběhu simulace.....	81
Obrázek 29 - Porovnání nevyhlazené a vyhlazené rychlosti rychlostního profilu na čase.....	83

Obrázek 30 - Výběr jízdního režmu simulace .....	83
Obrázek 31 - Zadávání časového kroku simulace při dynamickém režimu jízdy .....	83
Obrázek 32 - Graf skutečné a požadové rychlosti vůči času .....	87
Obrázek 33 - Graf skutečné a požadované rychlosti vůči ujeté vzdálenosti .....	87
Obrázek 34 - Detail zastavení modelu do zastávky ve vzdálenosti 8,13 km od počátku trasy	88
Obrázek 35 - Hlášení průběhu simulace .....	92
Obrázek 36 - Souhrnný výpis na konci simulace .....	93
Tabulka 1 - Technické parametry Škoda-Solaris 24m.....	17
Tabulka 2 – Parametrizace trasy Letiště → Nádraží Veleslavín .....	26
Tabulka 3 - Parametrizace trasy Nádraží Veleslavín → Letiště.....	27
Tabulka 4 - Seznam všech tříd v simulačním modelu vozidla .....	36
Tabulka 5 - Doby stání modelu podle typu zastávky.....	88
Tabulka 6 - Data ze simulace v režimu Profil při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště .....	99
Tabulka 7 - Data ze simulace v režimu Profil při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín .....	100
Tabulka 8 - Data ze simulace v režimu Dynamický při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště.....	103
Tabulka 9 - Data ze simulace v režimu Dynamický při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín .....	103
Tabulka 10 - Porovnání hodnot ze simulace mezi oběma simulačními režimy na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště.....	107
Tabulka 11 - Porovnání hodnot ze simulace mezi oběma simulačními režimy na trase Letiště -> Nádraží Veleslavín .....	107
Tabulka 12 - Vliv obsazenosti vozidla na spotřebu v dynamickém režimu na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště.....	109
Tabulka 13 - Vliv obsazenosti vozidla na spotřebu v dynamickém režimu na trase Letiště -> Nádraží Veleslavín.....	109
Tabulka 14 - Vliv časového kroku simulace na měřené veličiny v dynamickém režimu na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště .....	110
Tabulka 15 - Vliv časového kroku simulace na měřené veličiny v dynamickém režimu na trase Letiště -> Nádraží Veleslavín .....	111

Tabulka 16 - Vliv snižování maximální akcelerace modelu na měřené veličiny na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště.....	112
Tabulka 17 - Vliv snižování maximální decelerace modelu na měřené veličiny na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště.....	112
Graf 1 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě pod trolejí.....	29
Graf 2 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě na baterii .....	29
Graf 3 - Závislost příkonu pomocných pohonů na okolní teplotě při jízdě pod trolejí .....	30
Graf 4 - Závislost příkonu pomocných pohonů na okolní teplotě při jízdě na baterii .....	30
Graf 5 - Závislost příkonu 24V palubní sítě na okolní teplotě při jízdě pod trolejí.....	31
Graf 6 - Závislost příkonu 24V palubní sítě na okolní teplotě při jízdě na baterii .....	31
Graf 7 - Porovnání průměrných příkonů všech pomocných pohonů na vnější teplotě.....	32
Graf 1 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě pod trolejí (Převzato z kapitoly 2.1.3.).....	98
Graf 2 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě na baterii (Převzato z kapitoly 2.1.3.).....	99

## **SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK**

HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning – Vytápění, větrání a klimatizace vozidla

PP 400 VAC – Pomocné pohony na střídavé napětí 3x400 V/50 Hz – například kompresor pro pneumatické systémy (brzdy, dveře), chlazení trakčního měniče, trakčních motorů, čerpadla hydrauliky.

Palubní síť 24 VDC – nízkonapěťový stejnosměrný elektrický systém vozidla, který napájí různé elektronické a ovládací systémy vozidla. Na rozdíl od PP 400 VAC, které napájí výkonné pohony, 24V síť slouží především pro řízení a pomocné spotřebiče s nižší spotřebou jako komunikační systémy, osvětlení atd.

AUX – Auxiliary – souhrnné označení pro palubní pomocné systémy zajišťující vedlejší spotřebu (HVAC, PP 400 VAC, Palubní síť 24 VDC)

SOC – State of Charge – Stav nabití trakční baterie (%)

MHD – Veřejná městská hromadná doprava

## ÚVOD

Velká města v současnosti intenzivně usilují o snižování emisí z dopravy a zlepšení kvality ovzduší, čehož se snaží dosáhnout mimo jiné ekologizací městské hromadné dopravy. Trendem je postupná náhrada konvenčních dieselových autobusů vozidly s nulovými lokálními emisemi, jako jsou bateriové elektrobuses nebo trolejbusy. Praha si v rámci svého klimatického plánu stanovila cíl snížit emise CO<sub>2</sub> do roku 2030 o 45 % (oproti roku 2010) a zavádění elektrické dopravy do autobusových linek je tak jednou z priorit dopravního podniku [1].

Elektrifikace autobusových linek pomocí tzv. parciálních trolejbusů představuje perspektivní kompromis mezi klasickou trolejbusovou dopravou (závislou na souvislém trolejovém vedení) a čistě bateriovými elektrobuses. Parciální (bateriový) trolejbus je vybaven akumulátory a dokáže část trasy absolvovat pod trolejí a část trasy jet na baterie mimo trolejové vedení. Při brzdění vozidla dochází k rekuperaci energie zpět do troleje nebo do baterií, čímž se dále zvyšuje celková energetická účinnost provozu [2]. Hlavní výhodou tohoto řešení je, že není nutné elektrifikovat celou trasu – trolejové vedení se buduje jen v úsecích s vysokou zátěží nebo náročným profilem, zatímco zbylé části linky mohou zůstat bez trolejí. Tím se snižují náklady na infrastrukturu a omezuje zásah do městského prostředí, zhruba polovina trasy může díky bateriovému režimu zůstat nezadrátovaná. Zároveň vozidlo nepotřebuje tak velkou baterii jako elektrobuses. Nižší hmotnost baterií pozitivně ovlivňuje celkovou spotřebu energie a průběžné dobíjení prodlužuje jejich životnost [1].

Praha patří mezi města, která zavedla trolejbusovou dopravu v této moderní parciální podobě. Novodobý návrat trolejbusů do Prahy nastal na začátku roku 2024 spuštěním prvních linek 58 a 59 s bateriovými trolejbusy. Linka 59, spojující Nádraží Veleslavín (metro A) s Letištěm Václava Havla, zahájila pravidelný provoz v březnu 2024 (po zhruba měsíčním testování v rámci linky 58 z Palmovky do Letňan). Tato linka nahradila původní vytíženou autobusovou linku č. 119 a nasazením velkokapacitních trolejbusů došlo k výraznému zvýšení přepravní kapacity i komfortu a zároveň ke snížení emisí a hluku v okolí letiště. Nové tříčlánkové trolejbusy Škoda-Solaris 24m pojmu až 180 cestujících (cca o 30 % více než dosavadní kloubové autobusy), takže ve špičkách postačí jeden vůz namísto dvou souběžně jedoucích autobusů. Díky tichému elektrickému pohonu a nulovým lokálním emisím tato vozidla výrazně snižují ekologickou zátěž – podle odhadů ušetří stovky tisíc litrů nafty a produkce CO<sub>2</sub> poklesne asi o 1300 tun ročně. Elektrifikace linky 119/59 je součástí širší

koncepte využití alternativních pohonů v pražské MHD a byla podpořena evropskými fondy (Národní plán obnovy financoval výstavbu tratě i nákup trolejbusů). Přestože do budoucna se počítá s vybudováním kapacitního kolejového spojení na letiště (prodloužení trasy metra či železnice) jako finálním řešením, nasazení parciálních trolejbusů již nyní přináší zlepšení dopravní obslužnosti letiště a významné snížení emisí [2][3][4][6].

Tato práce se zaměřuje na tvorbu univerzálního simulačního modelu, který umožní analyzovat spotřebu elektrické energie parciálního trolejbusu na zadané trase. Hlavní cíle lze shrnout následovně:

- Navrhnout a vytvořit matematický model energetických toků parciálního trolejbusu (jízda pod trolejí vs. na baterii) vhodný pro simulační prostředí MATLAB.
- Implementovat model v uživatelsky přívětivé formě tak, aby umožňoval zadávání parametrů vozidla a trasy.
- Zajistit univerzálnost modelu – aplikovatelnost na libovolný typ vozidla (trolejbusu či elektrobusu) při změně vstupních parametrů, což umožní posouzení spotřeby energie pro různá vozidla a různé provozní podmínky.
- Porovnání simulací s jízdou reálného trolejbusu.
- Použití simulačního modelu pro zjištění vlivu obsazenosti vozidla cestujícími a vlivu rychlosti a zrychlení na spotřebu el. energie.

# 1. VOZIDLO A TRASA

## 1.1. Škoda-Solaris 24m

Škoda-Solaris 24m je tříčlánkový nízkopodlažní trolejbus o celkové délce 24,7 m, vyvinutý ve spolupráci firem Škoda Electric (ČR) a Solaris Bus & Coach (PL) od roku 2023. Jde o nejdelší trolejbusový typ, který byl dosud zařazen do pravidelného provozu v České republice. Svými rozměry i kapacitou překonává běžné kloubové trolejbusy (18 m) a řadí se k největším silničním vozidlům v MHD. Dopravní podnik hl. m. Prahy nakoupil pro linku 59 celkem 20 těchto vozidel (všechny jsou deponovány v garáži Řepy), přičemž stejný typ trolejbusu byl poprvé nasazen také v Bratislavě (16 vozů dodaných v roce 2023) [3][4].



Obrázek 1 - Škoda Solaris 24m [5]

Karoserie trolejbusu Škoda-Solaris 24m vychází z modelu Solaris Trollino 24 a konstrukčně navazuje na osvědčený dvoučlánkový autobus Solaris Urbino 18. Vozidlo je čtyřnápravové, skládá se ze tří segmentů spojených dvěma klouby (harmonikovými měchy). Druhá a třetí náprava jsou hnací – každou z nich pohání vlastní trakční elektromotor – zatímco první i čtvrtá náprava jsou říditelné pro zlepšení manévrovatelnosti dlouhého vozidla v městském provozu. Elektrickou výzbroj trolejbusu dodává skupina Škoda (systém Škoda

BlueDrive). Zahrnuje dvojici trakčních motorů o výkonu  $2 \times 160$  kW (každý na jedné hnací nápravě), trakční měniče na bázi technologie SiC a sadu akumulátorů Li-ion v technologii LTO. Trakční baterie o využitelné kapacitě cca 58–60 kWh jsou umístěny na střeše prvního článku a průběžně se dobíjejí z trolejového vedení během jízdy pod trolejí. Tato akumulovaná energie umožňuje vozidlu ujet přibližně až 10–11 km čistě na baterie mimo trolejové napájení, což je dostatečné pro překlenutí neelektrifikovaných úseků typických městských linek. Dobíjení baterií probíhá primárně za jízdy pod trolejí (tzv. systém IMC – *In Motion Charging*), případně i při stání na konečných zastávkách, které jsou vybaveny nabíjecím trolejovým vedením. Samozřejmostí je rekuperace brzděné energie – při každém brzdění vozidla dochází k vracení energie do trolejové sítě nebo k dobití baterií, pokud je vozidlo mimo trolej. Tím se zvyšuje celková účinnost využití energie v provozu a snižují se ztráty [7][8][9][10].

Trolejbus Škoda-Solaris 24m je plně nízkopodlažní (nástupní výška ~320 mm nad vozovkou) v celém prostoru pro cestující. Pro rychlou výměnu cestujících je vozidlo vybaveno pěti dvoukřídlými dveřmi (uspořádání 1-2-2-2) po pravé straně karoserie. Díky délce a vnitřnímu uspořádání nabízí trolejbus kapacitu až 180 cestujících (z toho 54 míst k sezení) – to je zhruba o třetinu více než u standardních 18m kloubových autobusů. Vzhledem k nasazení na letištní lince je interiér upraven pro přepravu objemných zavazadel (speciální police a prostory). Nechybí ani moderní informační a odbavovací systém – vozy jsou vybaveny LED informačními panely (4 vnitřní obrazovky rozmístěné v každém článku) a kamerovým dohledem. Samozřejmostí je také celovozová klimatizace pro zvýšení komfortu cestujících i v letních měsících. Maximální rychlost trolejbusu je elektronicky omezena na 65–70 km/h, což vyhovuje požadavkům městského i příměstského provozu v Praze [6][9].

Po technické stránce tedy trolejbusy Škoda-Solaris 24m představují špičkově vybavená vozidla kombinující výhody průběžně napájeného trolejbusu a bateriového elektrobuse. Jejich dva motory poskytují dostatečný výkon pro rychlou akceleraci i v náročném stoupání a relativně menší baterie s průběžným dobíjením nezatěžují vozidlo nadměrnou hmotností. Ve výsledku tak tento trolejbus dosahuje vysoké energetické efektivity provozu a je vhodný pro nasazení na frekventovaných městských linkách s částečně elektrifikovanou infrastrukturou.

Parametr	Hodnota
Délka	24 700 mm
Šířka	2 550 mm
Výška (se staženými sběrači)	3 500 mm
Celková maximální hmotnost	39 330 kg
Pohotovostní hmotnost	25 800 kg
Maximální rychlost	70 km/h
Počet náprav	4
Počet poháněných náprav	2 (druhá a třetí)
Počet řízených náprav	2 (přední a zadní)
Výkon trakčních elektromotorů	2 × 160 kW
Kapacita trakčních baterií	60 kWh
Kapacita vozidla (cestujících)	180
Kapacita vozidla (sedících)	54

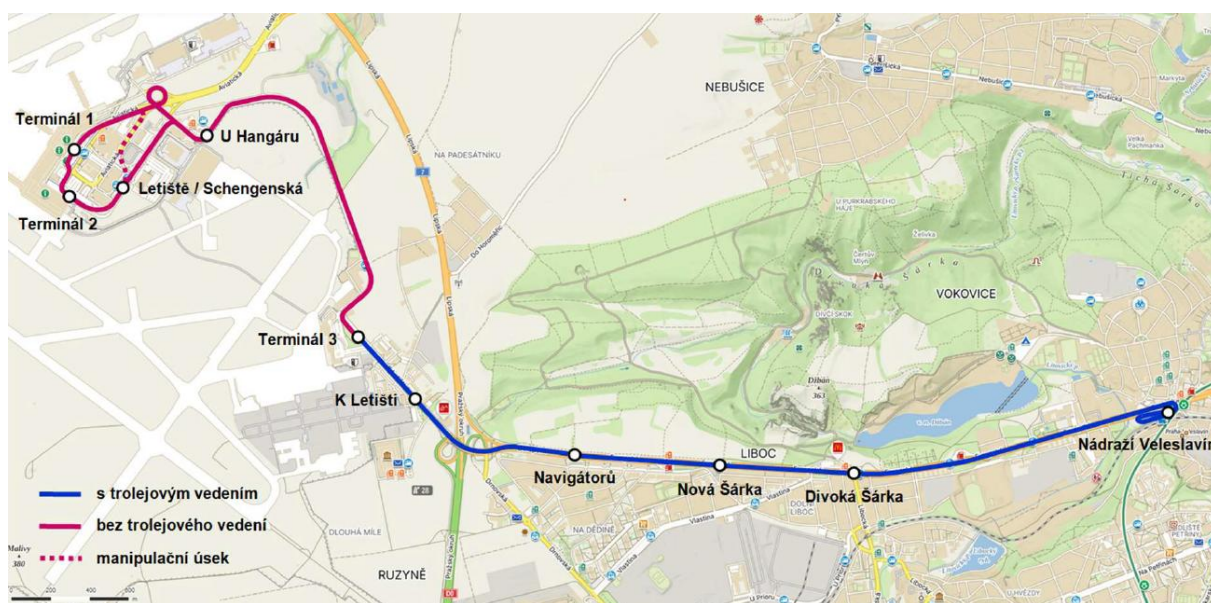
Tabulka 1 - Technické parametry Škoda-Solaris 24m

## 1.2. Trasa

Linka č. 59 spojuje dopravní uzel Nádraží Veleslavín (konečná stanice metra A a autobusový terminál v Praze 6) s Letištěm Václava Havla Praha v Ruzyni. Trasa v délce přibližně 9 km (v jednom směru) kopíruje původní autobusovou linku 119 a cestujícím zabere cesta zhruba 17 minut. Po cestě obsluhuje linka 59 několik zastávek v městské části Praha 6 např. Divoká Šárka, Nová Šárka, Sídliště Na Dědině a dále zastávky v areálu letiště: Terminál 3 (pro soukromé a charterové lety), U Hangáru, Terminál 1 a Terminál 2. Ve směru z centra trolejbusy končí v zastávce Letiště (Terminál 2). Celá trasa vede převážně po širokých komunikacích Evropská a K Letišti. Topografie trasy zahrnuje poměrně výrazné převýšení: oblast Nádraží Veleslavín (~300 m n.m.) a údolí Divoké Šárky leží pod úrovní letištní pláne (~380 m n.m.), takže mezi Veleslavínem a letištěm musí vozidla překonat souvislé stoupání. Stoupavý úsek se nachází zejména v počáteční části trasy od Nádraží Veleslavín přes Divokou Šárku a sídliště Dědina směrem k Terminálu 3, poté následuje spíše rovina v areálu letiště. Tato konfigurace měla vliv i na rozmístění trolejového vedení [1][11].



Obrázek 2 - Výškový profil trasy linky č. 59 MHD Praha



Obrázek 3 - Trasa linky č. 59 MHD Praha [12]

Z celkové délky trasy cca 50 % úseků disponuje trolejovým vedením, a to konkrétně od Nádraží Veveslavín až po Terminál 3. V tomto úseku, který pokrývá největší stoupání a energeticky nejnáročnější část jízdy se trolejbusy napájejí přímo z trakční trolejové sítě. Ve zbývajících částech trasy od Terminálu 3 přes zastávky v areálu letiště (U Hangáru, Terminál 1 a Terminál 2) jedou vozidla na bateriový pohon bez přímého trolejového napájení. Trolejové vedení začíná již v obratišti Nádraží Veveslavín (kde byla vybudována průjezdná nabíjecí stopa) a končí před kruhovým objezdem u Terminálu 3. V tomto místě trolejbus automaticky stáhne sběrače z troleje a zbytek trasy k Terminálu 1/2 pokračuje na baterie. Při jízdě opačným směrem (z letiště) se vůz opět připojí k trolejovému vedení v zastávce Terminál 3 a následující úsek až do Veveslavína jede pod trolejí nepřetržitě (Obrázek 4). Na obou konečných stanicích (Letiště a Nádraží Veveslavín) jsou zřízena nabíjecí stání, krátké úseky trolejového vedení v prostoru

obrátiště, kde mohou trolejbusy během pobytu dobít své baterie (Obrázek 5). Doplňková nabíjecí infrastruktura byla instalována také v domovské garáži Řepy [1][6].



Obrázek 4 – Navádění sběračů při jejich zvedání pomocí stříšek [12]



Obrázek 5 - Nabíjecí místa na konečné zastávce Letiště [12]

Kombinace části trasy s infrastrukturou a části bez ní byla zvolena z důvodu optimalizace nákladů i provozní efektivity. Provozní parametry linky 59 jsou pro nasazení parciálních trolejbusů velmi příznivé. Relativně krátká vzdálenost ~9 km a možnost dobíjení na obou koncích trasy umožňuje použití středně velkých baterií bez rizika vybití. Na rozdíl od čistě bateriových elektrobuses zde odpadá nutnost instalovat akumulátory o extrémně velké kapacitě (tím se snižuje celková hmotnost i spotřeba vozidla) a průběžné nabíjení menšími

proudy navíc prodlužuje životnost baterií. Linka 59 tak v praxi ověřuje koncept částečně bezdrátové elektrické dopravy ve velmi náročných podmínkách, jde o frekventovanou letištní linku s vysokým počtem spojů (interval ve špičce pouhé 3 minuty) a s velkým počtem přepravovaných osob. Tato intenzita provozu umožňuje důkladně otestovat spolehlivost vozidel i infrastruktury. Celkově lze linku 59 považovat za úspěšný pilotní projekt, který prokázal schopnost parciálních trolejbusů spolehlivě nahradit klasické dieselové autobusy i na takto vytížené trase. Zkušenosti získané z jejího provozu poslouží při plánování další etapy elektrifikace pražských autobusových linek v rámci přechodu k bezemisní městské dopravě [1][11].

## **2. SIMULAČNÍ MODEL**

### **2.1. Technické předpoklady pro model**

Následující kapitola je věnována detailnímu přehledu technických vstupních předpokladů, které jsou zásadní pro správné sestavení a fungování simulačního modelu parciálního trolejbusu. Aby simulace co nejvěrněji odpovídala reálnému provozu, je nezbytné nejprve definovat základní strukturu systému vozidla a specifikovat jednotlivé energetické toky mezi jeho komponentami. Dále je nutné přesně popsat samotnou trasu, na které bude vozidlo provozováno, včetně provozních parametrů jednotlivých úseků, jako jsou rychlostní limity, zastavení či topografické charakteristiky. V neposlední řadě je důležitým vstupem také zohlednění vlivu okolních klimatických podmínek, které významně ovlivňují spotřebu energie pomocných systémů vozidla, především pak topení a klimatizace. Tyto aspekty jsou v následujících podkapitolách postupně a detailně rozpracovány.

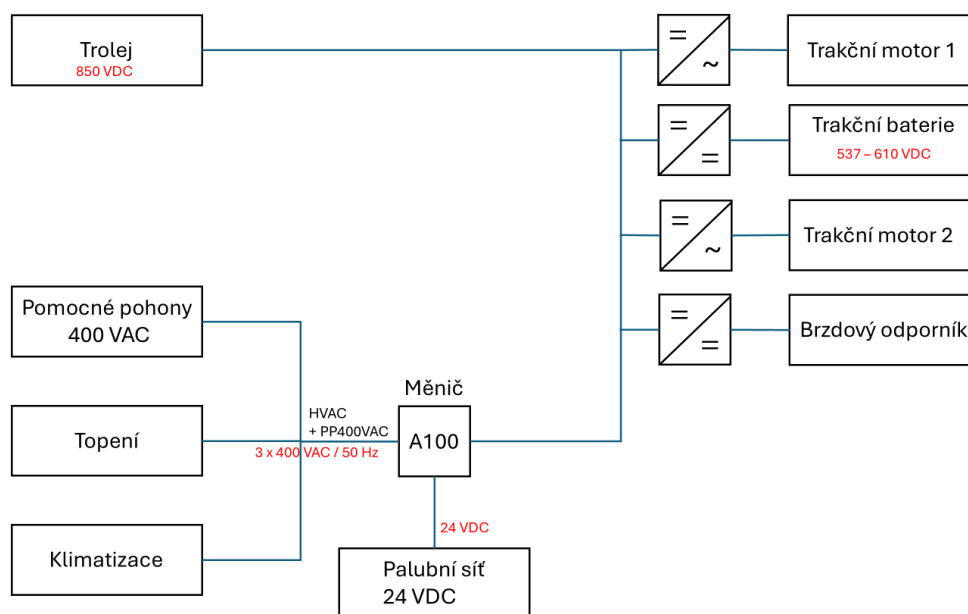
#### **2.1.1. Blokové schéma a energetické toky ve vozidle**

Následující blokové schéma (Obrázek 6) znázorňuje zjednodušené zapojení vozidla Škoda-Solaris 24 m, které je použito v simulačním modelu pro lepší přehled o energetických tocích uvnitř vozidla.

Blokové schéma lze rozdělit na část trakční a část pro napájení ostatních zařízení vozidla. Do ostatních zařízení vozidla patří bloky označené jako HVAC (topení a klimatizace), pomocné pohony (PP 400 VAC) a palubní stejnosměrná síť 24 V.

HVAC a pomocné pohony PP 400 VAC jsou napájeny z třífázového napětí 3x 400 V / 50 Hz. Mezi pomocné pohony PP 400 VAC patří např. chlazení trakčních motorů a výkonových měničů, vzduchový kompresor pro pneumatické systémy vozidla (např. brzdy a dveře) nebo hydraulická čerpadla. O jednotlivé napěťové úrovně pro napájení dílčích pomocných pohonů a systémů se starají příslušné měniče, v blokovém schématu souhrnně označené jako A100.

Celý systém vozidla je napájen buď sběračem z trolejového vedení stejnosměrným napětím v rozsahu 750–850 V (pro účely simulace zvoleno 850 V), nebo trakční baterií, která poskytuje stejnosměrné napětí v rozmezí 537–610 V. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1, vozidlo je vybaveno dvěma trakčními elektromotory a také brzdovým odporníkem, který slouží k rozptýlení nadbytečné energie vznikající při brzdění vozidla.



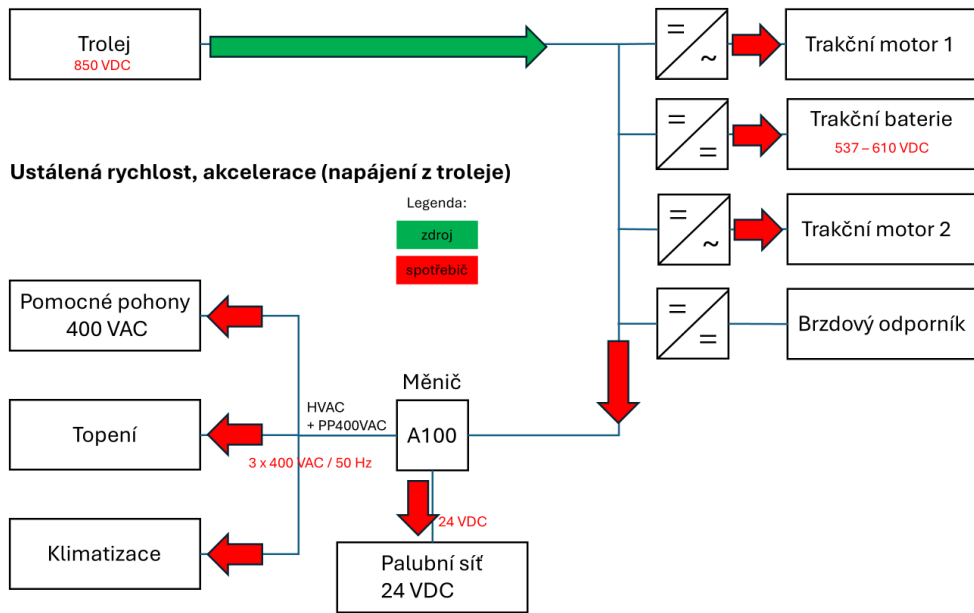
Obrázek 6 - Zjednodušené blokové schéma Škoda-Solaris 24m

Při jízdě vozidla pod trolejovým vedením je elektrická energie odebírána ze sběrače a využívána k napájení všech palubních systémů vozidla, včetně trakčních motorů, pomocných pohonů a k případnému dobíjení trakční baterie (Obrázek 7).

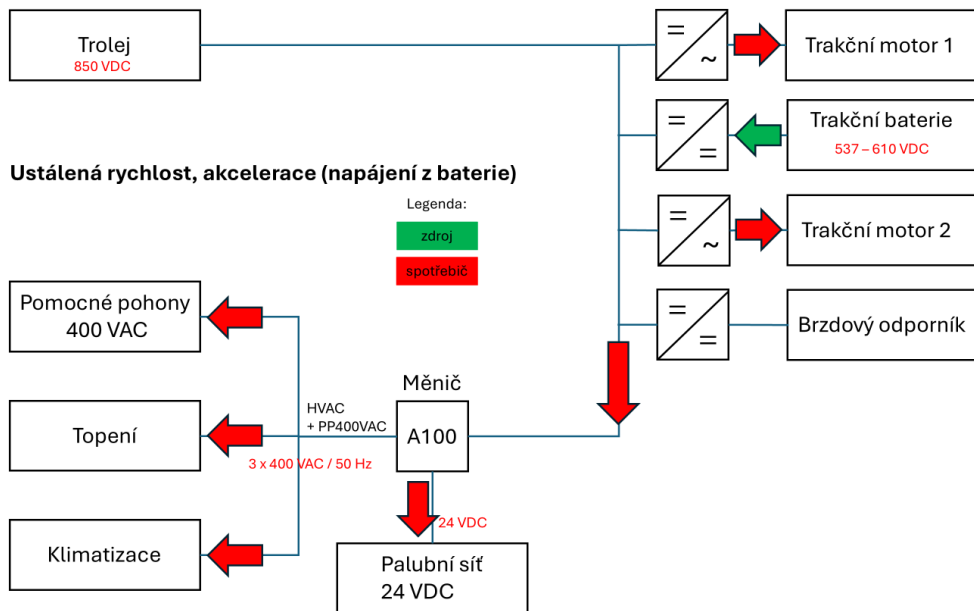
Pokud se vozidlo pohybuje mimo elektrifikovaný úsek, dochází k úplnému přepnutí napájení všech systémů vozidla výhradně na trakční baterii (Obrázek 8).

Pro zjednodušení simulačního modelu není implementováno zpětné odvádění rekuperované energie do trolejového vedení při jízdě pod trolejí. Proto v případě rekuperace během brzdění nastávají dvě možné situace:

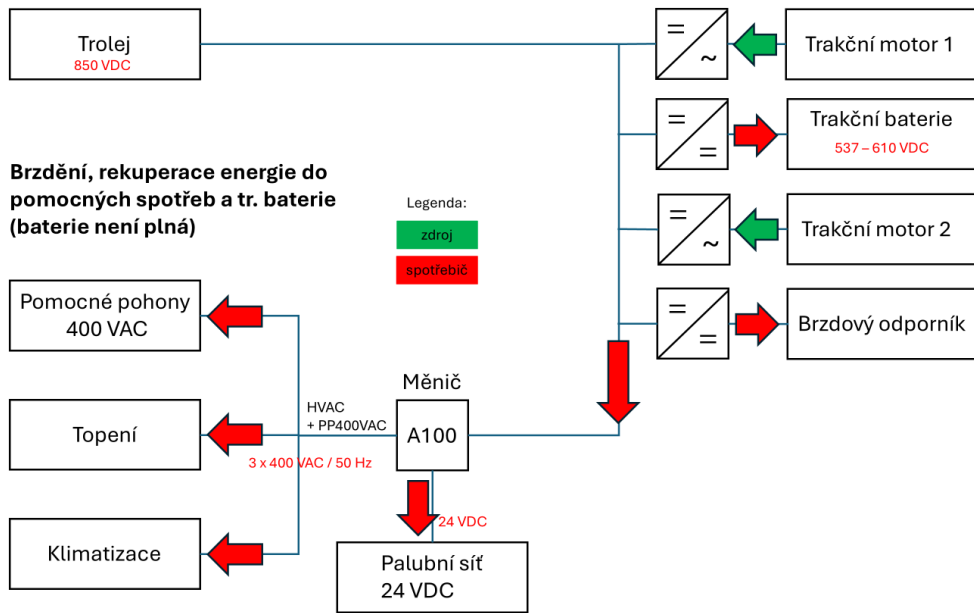
- Pokud trakční baterie není plně nabitá, rekuperovaná energie se prioritně využívá pro napájení pomocných pohonů. Přebytečná energie je následně směřována do trakční baterie. Jestliže však výkon rekuperace překročí nabíjecí limit baterie, je zbývající energie odváděna do brzdového odporníku a mařena ve formě tepla (Obrázek 9).
- V případě, že je trakční baterie již plně nabitá, rekuperovaná energie pokrývá pouze spotřebu pomocných pohonů, a jakákoli zbývající energie je ihned odváděna do brzdového odporníku, kde je definitivně zmařena ve formě tepla (Obrázek 10).



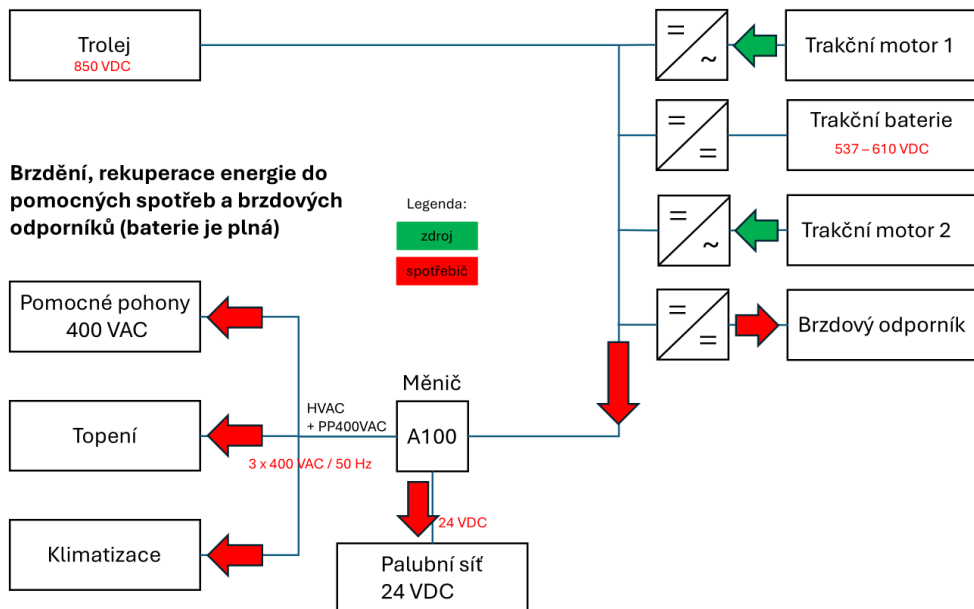
Obrázek 7 - Energetické toky ve vozidle při napájení z troleje



Obrázek 8 - Energetické toky ve vozidle při napájení z trakční baterie



Obrázek 9 - Energetické toky při rekuperaci vozidla v situaci, kdy trakční baterie je schopna přijmout energii



Obrázek 10 - Energetické toky při rekuperaci vozidla v situaci, kdy trakční baterie není schopna přijmout energii

### 2.1.2. Parametrizace trasy pro model

Pro potřeby simulačního modelu trolejbusu byla vytvořena detailní specifikace trasy spojující konečné body „Letiště“ a „Nádraží Veveslavín“. Tento podrobný popis trasy vychází ze zpracovaných mapových podkladů dostupných prostřednictvím služby Mapy.cz a slouží jako vstupní data pro simulaci provozních režimů vozidla a analýzu energetické náročnosti.

Každá trasa je rozčleněna na jednotlivé úseky, jejichž hranice byly stanoveny podle významných bodů z hlediska provozní dynamiky trolejbusu. Konkrétně jde o místa pravidelných zastavení (zastávky městské hromadné dopravy, světelné křižovatky, přechody pro chodce), dále místa, kde se významně mění sklon vozovky, body změn maximální povolené rychlosti, úseky, kde je nutné snížení rychlosti vozidla kvůli bezpečnostním opatřením (např. ostré zatáčky), a také body přechodu mezi úseky s trolejovým vedením a úseky bez elektrického vedení.

Pro každý takto definovaný úsek jsou uvedeny detailní provozní parametry, jako jsou absolutní hodnoty nadmořských výšek, ze kterých byly následně odvozeny přesné hodnoty sklonů jednotlivých úseků trasy. Součástí těchto údajů jsou rovněž informace o rychlostních limitech platných v jednotlivých úsecích a explicitní údaje o tom, zda se daný úsek nachází pod trolejovým vedením, nebo zda je provoz realizován čistě z trakční baterie vozidla.

Pro úplnost a přehlednost jsou všechny tyto provozní údaje shrnuty ve dvou samostatných tabulkách. Každá tabulka reprezentuje jeden směr trasy, což umožňuje přesně simulovat rozdílné energetické požadavky a provozní charakteristiky trolejbusu při jízdě v opačných směrech. Tyto detailně popsané trasy tvoří klíčový základ pro analýzu spotřeby elektrické energie vozidla v reálných provozních podmínkách. Důležitou součástí tabulky trasy je také sloupec “Zastavení na začátku úseku”, pomocí kterého lze volně nadefinovat ve kterých místech bude vozidla na trase zastavovat a tím se lépe přiblížit konkrétní reálné jízdě vozidla na trase.

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod, popis	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]	Zastavení na začátku úseku [ano/ne]
0	stání pro trolejbus	362	80	1,250	ne	20	ano
0,08	výjezd na ulici Schengenská	363	130	-0,769	ne	50	ano
0,21	přechod pro chodce	362	290	0,690	ne	50	ano
0,5	ostré odbočení vlevo - začátek	364	70	0,000	ne	50	ne
0,57	ostré odbočení vlevo - konec	364	253	-0,790	ne	50	ne
0,823	závora – Terminál 1 vjezd	362	14	0,000	ne	30	ano
0,837	přechod pro chodce	362	41	0,000	ne	30	ano
0,878	přechod pro chodce	362	22	0,000	ne	30	ano
0,9	přechod pro chodce	362	100	0,000	ne	30	ano
1	zastávka Terminál 1 E	362	10	0,000	ne	30	ano
1,01	přechod pro chodce	362	30	0,000	ne	30	ano
1,04	závora – Terminál 1 výjezd	362	60	0,000	ne	30	ano
1,1	ostré odbočení k Terminálu 2	362	100	0,000	ne	30	ne
1,2	ostré zabočení doleva	362	50	2,000	ne	30	ne
1,25	zastávka Terminál 2 A	363	100	0,000	ne	30	ano
1,35	přechod pro chodce	363	80	2,499	ne	50	ano
1,43	změna sklonu	365	170	-1,176	ne	50	ne
1,6	přechod pro chodce	363	80	-1,250	ne	50	ano
1,68	zastávka Schengenská	362	30	0,000	ne	50	ano
1,71	Křižovatka Schengenská – Jana Kašpara	362	55	0,000	ne	50	ne
1,765	přechod pro chodce	362	292	-0,685	ne	50	ano
2,057	přechod pro chodce	360	20	0,000	ne	50	ano
2,077	kruhový objezd - začátek	360	20	0,000	ne	50	ne
2,097	kruhový objezd - konec	360	61	0,000	ne	50	ne
2,158	přechod pro chodce	360	115	-0,870	ne	50	ano
2,273	přechod pro chodce, ostrá levotočivá zatáčka	359	56	0,000	ne	50	ano
2,329	přechod pro chodce	359	48	-2,083	ne	50	ano
2,377	zastávka U Hangáru	358	150	-1,333	ne	50	ano
2,527	ostrá pravotočivá zatáčka	356	210	-0,476	ne	50	ne
2,737	změna rychlosti	355	490	-1,020	ne	70	ne
3,227	změna sklonu	350	540	1,481	ne	70	ne
3,767	změna rychlosti	358	390	1,026	ne	50	ne
4,157	kruhový objezd - začátek	362	70	1,428	ne	50	ne
4,227	kruhový objezd - konec	363	80	0,000	ne	50	ne
4,307	zastávka Terminál 3	363	12	0,000	ano	50	ano
4,319	přechod pro chodce	363	84	1,190	ano	50	ano
4,403	přechod pro chodce	364	231	0,433	ano	50	ano
4,634	přechod pro chodce	365	59	0,000	ano	50	ano
4,693	zastávka K Letišti	365	39	0,000	ano	50	ano
4,732	přechod pro chodce	365	95	1,053	ano	50	ano
4,827	světelná křižovatka K Letišti – Fajtlava	366	138	0,000	ano	50	ano
4,965	světelná křižovatka K Letišti – Pražský okruh	366	163	1,227	ano	50	ano
5,128	změna sklonu	368	55	-1,818	ano	50	ne
5,183	světelná křižovatka Evropská – K Letišti – Drnovská	367	85	-1,176	ano	50	ano
5,268	změna rychlosti	366	300	0,000	ano	70	ne
5,568	změna rychlosti	366	70	0,000	ano	50	ne
5,638	zastávka Navigátorů	366	30	0,000	ano	50	ano
5,668	světelná signalizace – přechod pro chodce	366	30	0,000	ano	50	ano
5,698	změna rychlosti	366	660	-2,878	ano	70	ne
6,358	změna rychlosti	347	50	-2,000	ano	50	ne
6,408	zastávka Nová Šárka	346	43	-4,648	ano	50	ano
6,451	světelná signalizace – přechod pro chodce	344	817	-1,224	ano	50	ano
7,268	světelná křižovatka Evropská – Vlastina	334	-140	1,428	ano	50	ano
7,128	světelná signalizace – křížení s tramvají	332	-80	2,499	ano	50	ne
7,048	zastávka Divoká Šárka	330	195	-0,513	ano	50	ano
7,243	světelná signalizace – přechod pro chodce	329	303	-2,310	ano	50	ano
7,546	světelná křižovatka Evropská – Do Vozovny	322	110	-0,909	ano	50	ano
7,656	změna rychlosti	321	346	-2,312	ano	60	ne
8,002	světelná křižovatka Evropská – José Martího	313	241	-2,904	ano	60	ano
8,243	změna sklonu	306	300	0,333	ano	60	ne
8,543	změna sklonu	307	223	1,345	ano	60	ne
8,766	světelná křižovatka Evropská – Veveslavinská, začátek	310	70	2,856	ano	50	ano
8,836	světelná křižovatka Evropská – Veveslavinská, konec	311	34	-5,876	ano	50	ne
8,87	zastávka Nádraží Veveslavín V	312	90	-3,332	ano	20	ano
8,96	stání pro trolejbus	309	0	-3,332	ano	20	ano

Tabulka 2 – Parametrizace trasy Letiště → Nádraží Veveslavín

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod, popis	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]	Zastavení na začátku úseku [ano/ne]
0,00	stání pro trolejbus	309	220	1,4	ano	20	ano
0,22	Zastávka Nádraží Veveřslavín 2	312	60	-1,7	ano	50	ano
0,28	výjezd na ulici Veveřslavínská	311	35	-2,9	ano	50	ano
0,32	světelná křižovatka Evropská – Veveřslavínská, začátek	310	165	-3,6	ano	60	ano
0,48	světelná křižovatka Evropská – Veveřslavínská, konec	310	140	-2,9	ano	60	ne
0,62	změna sklonu	304	226	0,9	ano	60	ano
0,85	změna rychlosti	306	150	2,0	ano	50	ne
1,00	změna rychlosti	309	97	3,1	ano	60	ne
1,09	světelná křižovatka Evropská – José Martího	312	160	2,5	ano	60	ano
1,25	změna rychlosti	316	263	1,9	ano	50	ne
1,52	světelná křižovatka Evropská – Do Vozovny	321	100	2,0	ano	50	ano
1,62	změna rychlosti	323	280	1,8	ano	60	ne
1,90	světelná signalizace - křížení s tramvají	328	90	2,2	ano	60	ano
1,99	světelná signalizace – křížení s tramvají	330	60	0,0	ano	60	ano
2,05	světelná křižovatka Evropská – Libocká	330	103	1,0	ano	50	ano
2,15	zastávka Divoká Šárka	331	90	2,2	ano	50	ano
2,24	světelná křižovatka Evropská – Vlastina	333	443	2,5	ano	50	ano
2,68	světelná signalizace – přechod pro chodce	344	47	4,3	ano	50	ano
2,73	zastávka Nová Šárka	346	70	1,4	ano	50	ano
2,80	změna rychlosti	347	580	3,1	ano	70	ne
3,38	změna rychlosti	365	74	1,4	ano	50	ne
3,45	zastávka Navigátorů	366	260	-0,4	ano	70	ano
3,71	změna rychlosti	365	190	0,5	ano	50	ne
3,90	světelná křižovatka Evropská – K Letišti – Drnovská	366	100	2,0	ano	50	ano
4,00	změna sklonu	368	110	-0,9	ano	50	ne
4,11	světelná křižovatka K Letišti – Pražský okruh	367	152	-0,7	ano	50	ano
4,27	světelná křižovatka K Letišti – Fajtlůva	366	98	-1,0	ano	50	ano
4,36	zastávka K Letišti	365	26	0,0	ano	50	ano
4,39	přechod pro chodce	365	96	0,0	ano	50	ano
4,49	přechod pro chodce	365	233	-0,4	ano	50	ano
4,72	přechod pro chodce	364	82	-1,2	ano	50	ano
4,80	přechod pro chodce	363	41	0,0	ano	50	ano
4,84	zastávka Terminál 3	363	105	-1,0	ne	50	ano
4,95	kruhový objezd - začátek	362	30	0,0	ne	50	ne
4,98	kruhový objezd - konec	362	295	-1,4	ne	50	ne
5,27	změna rychlosti	358	570	-1,4	ne	70	ne
5,84	změna sklonu	350	510	1,0	ne	70	ne
6,35	změna rychlosti	355	168	0,6	ne	50	ne
6,52	ostrá levotočivá zatáčka - začátek	356	40	0,0	ne	50	ne
6,56	ostrá levotočivá zatáčka - konec	356	180	1,7	ne	50	ne
6,74	zastávka U Hangáru	359	12	0,0	ne	50	ano
6,75	přechod pro chodce	359	20	0,0	ne	50	ano
6,77	ostrá pravotočivá zatáčka - začátek	359	30	0,0	ne	50	ne
6,80	ostrá pravotočivá zatáčka - konec, přechod pro chodce	359	116	0,9	ne	50	ano
6,92	přechod pro chodce	360	62	0,0	ne	50	ano
6,98	kruhový objezd - začátek	360	60	0,0	ne	50	ne
7,04	kruhový objezd - konec	360	98	-2,0	ne	50	ne
7,14	nájezd na ulici Aviatická – začátek	358	184	2,7	ne	50	ne
7,32	nájezd na ulici Aviatická – konec	363	377	-0,3	ne	50	ne
7,70	závora – Terminál 1 vjezd	362	10	0,0	ne	30	ano
7,71	přechod pro chodce	362	40	0,0	ne	30	ano
7,75	přechod pro chodce	362	79	0,0	ne	30	ano
7,83	zastávka Terminál 1 C	362	23	0,0	ne	30	ano
7,85	přechod pro chodce	362	-50	0,0	ne	30	ano
7,80	přechod pro chodce	362	33	0,0	ne	30	ano
7,83	závora – Terminál 1 výjezd	362	52	0,0	ne	30	ano
7,89	odbočení k Terminálu 2	362	101	0,0	ne	30	ne
7,99	ostré zabočení doleva	362	36	2,8	ne	30	ne
8,02	zastávka Terminál 2 C	363	114	0,0	ne	30	ano
8,14	přechod pro chodce	363	92	2,2	ne	50	ano
8,23	změna sklonu	365	147	0,0	ne	50	ne
8,38	přechod pro chodce	365	93	-3,2	ne	50	ano
8,47	odbočení k zastávce Letiště	362	91	0,0	ne	50	ne
8,56	zastávka Letiště	362	45	0,0	ne	20	ano
8,60	stání pro trolejbus	362	0	0,0	ne	20	ano

Tabulka 3 - Parametrizace trasy Nádraží Veveřslavín → Letiště

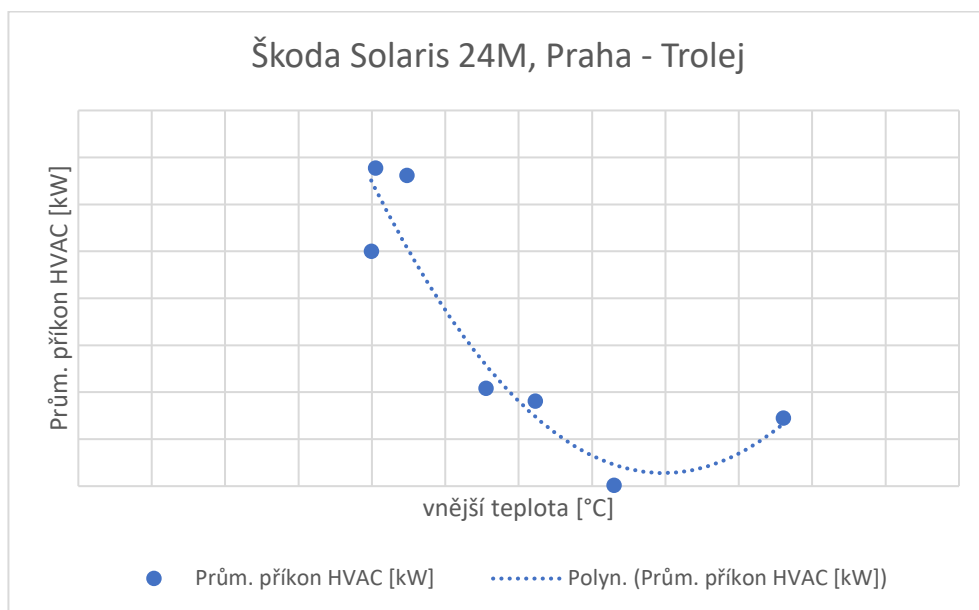
### **2.1.3. Závislosti průměrných příkonů jednotlivých pomocných pohonů na venkovní teplotě**

V rámci přípravy simulačního modelu byly analyzovány reálně naměřené průběhy průměrných elektrických příkonů jednotlivých bloků připojených k měniči A100 (Obrázek 6). Tato data byla získána během pěti samostatných měření reálného provozu vozidla v průběhu jednoho roku, přičemž každé měření trvalo přibližně čtyři hodiny a pokrývalo různá roční období (jaro, léto, podzim, zima). Na základě těchto měření bylo možné sestavit závislosti příkonů jednotlivých skupin pomocných spotřebičů (HVAC, PP 400 VAC, 24 VDC síť) na venkovní teplotě, které vykazují výraznou sezónní variabilitu. Tyto závislosti jsou aproximací reálných naměřených dat pomocí polynomu druhého stupně, což umožňuje efektivněji implementovat závislosti příkonů jednotlivých součástí vozidla v rámci simulace. Zejména v zimních měsících s aktivním topením HVAC, ale také během letního provozu s intenzivním chlazením, se příkon pomocných systémů podílí výrazně na celkové spotřebě elektrické energie vozidla. Proto bylo jejich přesné modelování považováno za klíčové pro realistické výsledky simulace.

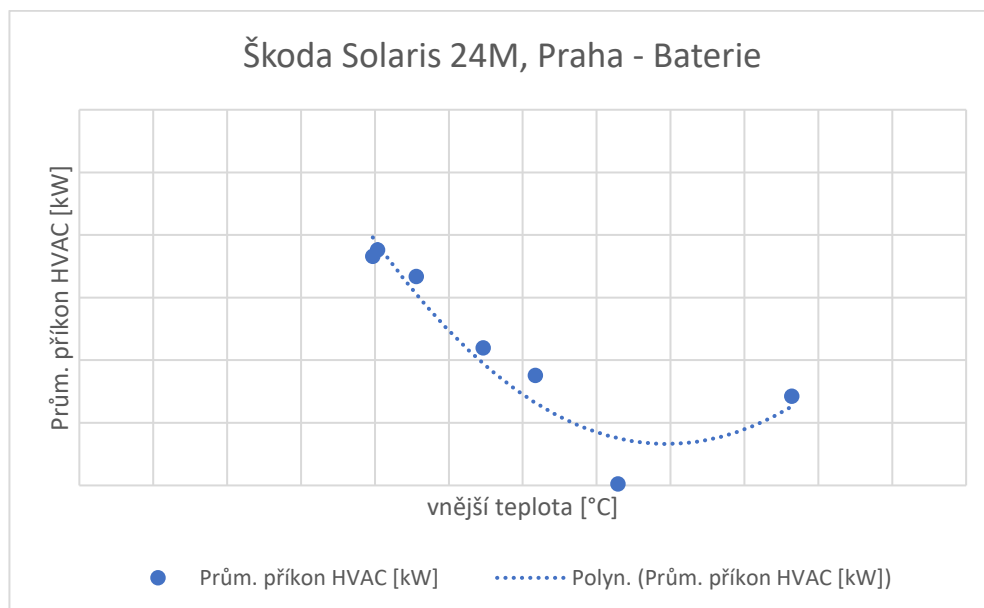
Křivky jsou přitom omezeny hranicemi danými maximálními možnými příkony příslušných bloků vozidla. Například blok HVAC má specifické omezení příkonu jak z levé, tak pravé strany. Levé omezení odpovídá maximálnímu možnému elektrickému příkonu topení prostoru pro cestující (salón vozidla) společně s topením prostoru řidiče (frontboxu). Pravé omezení pak představuje maximální příkon klimatizační jednotky vozidla, která má v provozu výrazně nižší energetické nároky než samotné topení.

Právě na příkladu systému HVAC lze dobře ilustrovat výrazný rozdíl ve spotřebě energie způsobený různými provozními režimy topení a klimatizace. Kromě toho zde hraje důležitou roli skutečnost, zda se vozidlo nachází pod trolejovým vedením (Graf 1), nebo zda využívá výhradně energii z trakční baterie (Graf 2). V režimu bateriového provozu totiž dochází k automatickému odpojení části topného výkonu s cílem výrazně snížit odběr elektrické energie

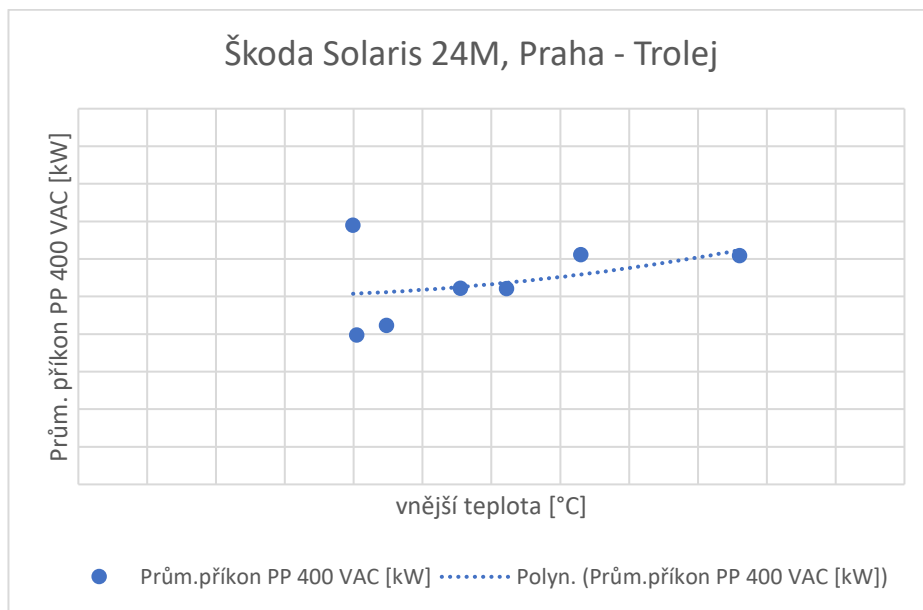
prodloužit tak celkový dojezd vozidla na baterii. Tento rozdíl režimů zásadně ovlivňuje výslednou energetickou bilanci simulovaného vozidla.



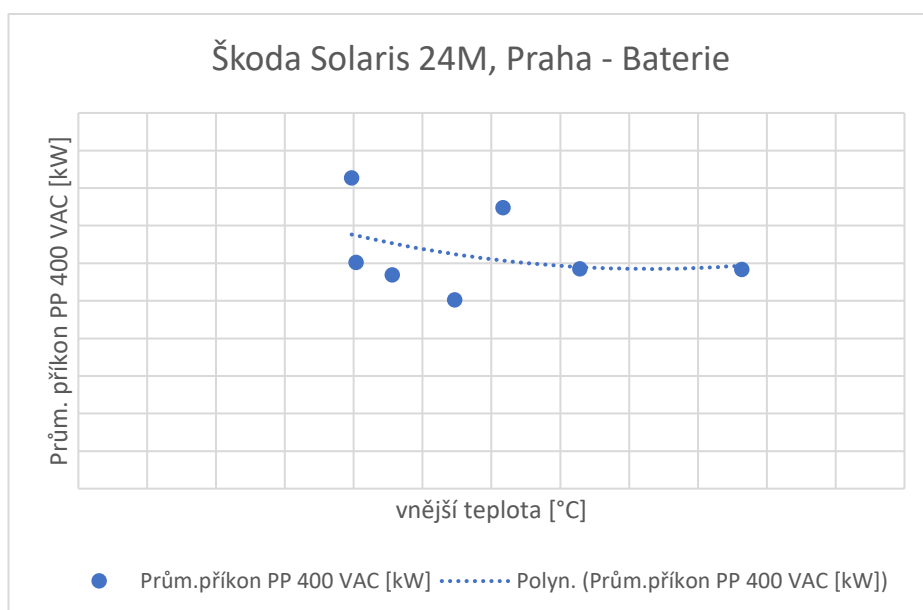
Graf 1 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě pod trolejí



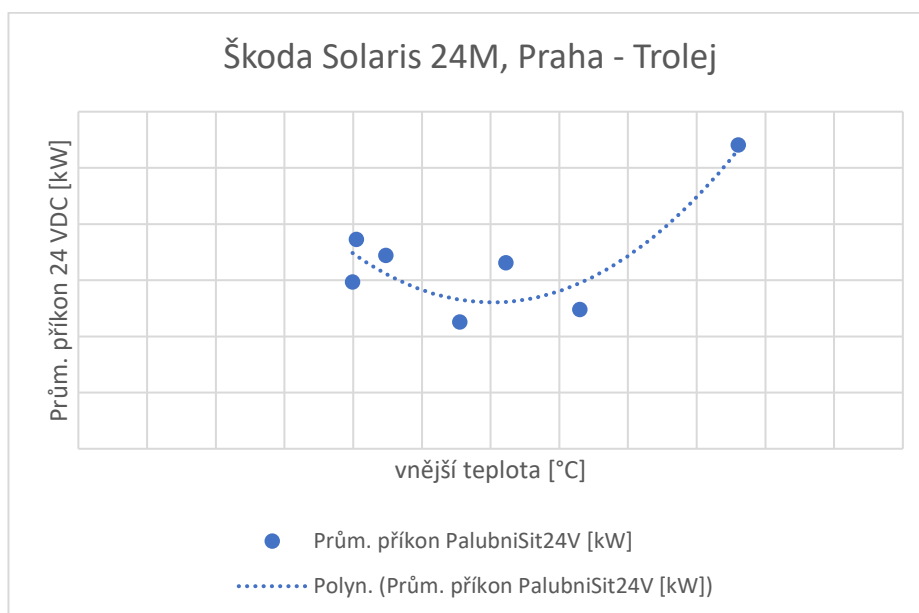
Graf 2 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě na baterii



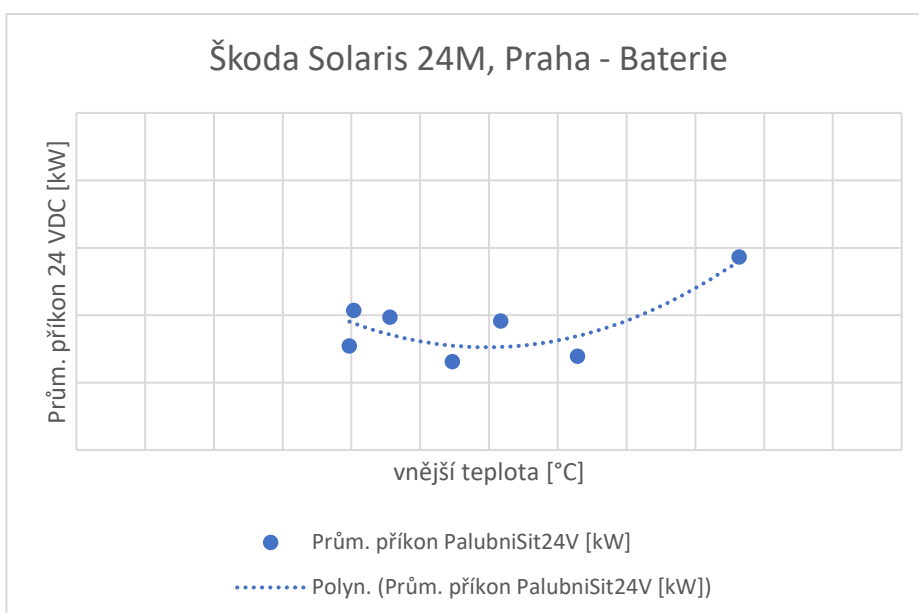
Graf 3 - Závislost příkonu pomocných pohonů na okolní teplotě při jízdě pod trolejí



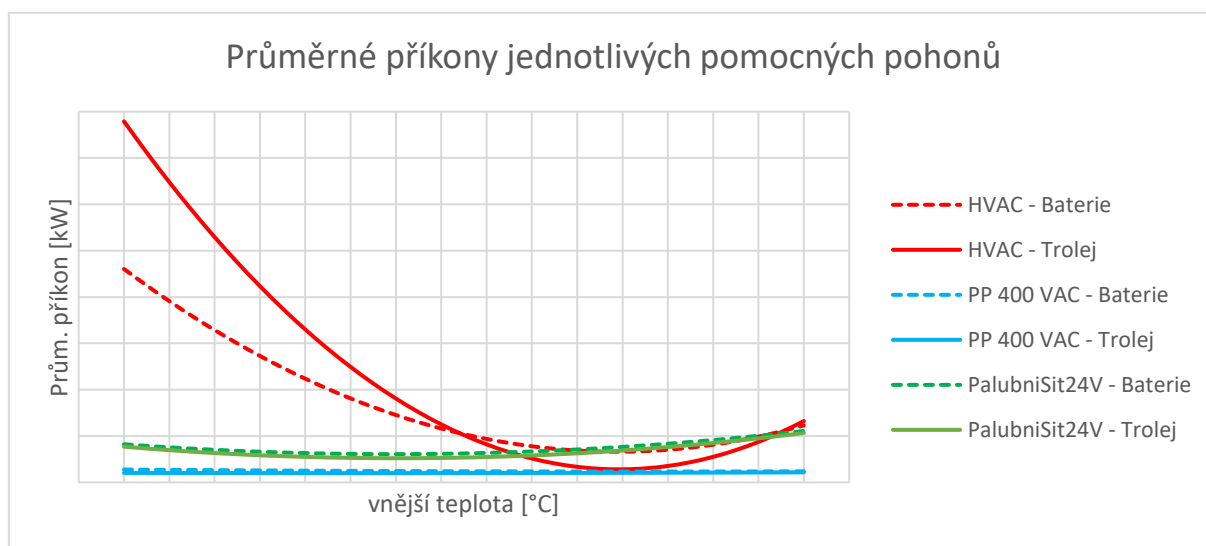
Graf 4 - Závislost příkonu pomocných pohonů na okolní teplotě při jízdě na baterii



Graf 5 - Závislost příkonu 24V palubní sítě na okolní teplotě při jízdě pod trolejí



Graf 6 - Závislost příkonu 24V palubní sítě na okolní teplotě při jízdě na baterii



Graf 7 - Porovnání průměrných příkonů všech pomocných pohonů na vnější teplotě

## 2.2. Program simulačního modelu

Simulační model slouží k výpočtu časového průběhu výkonů a energií v různých částech vozidla při jízdě na zadané trase, a ke sledování stavu baterie (SOC) v čase. Hlavním cílem je simulace spotřeby energie z troleje a z baterie v závislosti na jízdním profilu, topografii trasy a podmínkách provozu, a vytvořit podklad pro analýzu efektivitu provozu. Model využívá tzv. “backward-facing” princip výpočtu, postupuje od požadovaného pohybu vozidla (kol) směrem ke zdroji energie. Vstupem simulace je proto typicky profil rychlosti vozidla v čase (např. záznam skutečné jízdy nebo generovaný z rychlostních omezení trasy) a popis trasy (sklon, zastávky, max. povolená rychlost) a z těchto veličin model v každém časovém kroku odvozuje potřebnou hnací sílu na kolech a počítá příkon každé komponenty v řetězci od kola po zdroj energie se zohledněním omezení v jednotlivých komponentách. Výstupem jsou pak zejména okamžité hodnoty požadovaného elektrického výkonu z troleje nebo baterie, spotřeba výkonu pomocných pohonů, energie rozptýlené v odporníku či brzdách apod., vše vztažené k času jízdy. Model tak umožňuje získat detailní energetickou bilanci vozidla a vyhodnotit průběh stavu nabití baterie v čase. Jednotlivé komponenty jsou přitom reprezentovány buď pomocí tabulkových závislostí (např. mapa účinnosti motoru, rychlostní profil z měření) nebo zjednodušenými konstantními účinnostmi. Simulační model reprezentuje skutečné uspořádání trolejbusu Škoda-Solaris 24m, který má dvě poháněné nápravy (každou s vlastním trakčním elektromotorem a měničem). Kvůli zjednodušení je však v modelu použita pouze jedna společná převodovka, jež představuje pevný převod mezi koly a motorem. Požadovaný krouticí

moment je v modelu rozdělen rovnoměrně na oba motory. Oba motory v simulaci jsou totožné a provozovány synchronně.

Simulační model zvládá:

- Výpočet výkonů a energií v různých částech vozidla v čase (Sběrač, trakční motory, SOC, HVAC a pomocné pohony atd.).
- Zahrnutí vlivu ročního období – příkon HVAC a pomocných pohonů dle teploty okolí.
- Simulace vozidla na jakékoliv trase podle požadavků definice trasy v kapitole 2.1.2, ale pouze simulace jednoho vozu na trase v čase.
- Jízdu po trase ve 2 různých režimech, kdy v jednom vozidlo následuje rychlostní profil trasy a ve druhém jede podle rychlostního limitu a žádaného zrychlení.
- Poptání uživatele na základní podmínky jízdy pro opakované simulování v různých teplotách a s jinou počáteční hodnotou SOC, případně jiným časovým krokem v případě dynamického režimu.

Simulační model nezvládá:

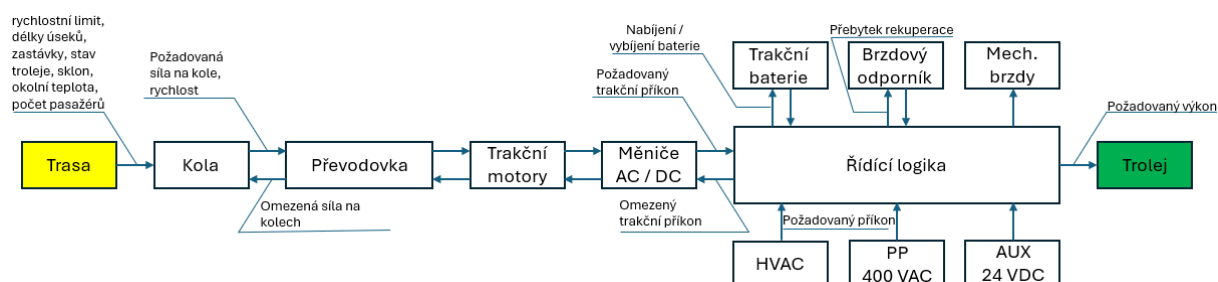
- Proměnlivou hmotnost vozidla během trasy (nastupování/ vystupování cestujících), hmotnost vozidla reaguje pouze na zadaný počet cestujících před začátkem simulace.
- Rekuperování zpět do sběrače a trolejového vedení.
- Jízdy podle jízdního řádu (pouze jízda podle rychlostního profilu z reálné jízdy toto má již zahrnuto v samotném profilu).
- Zohlednit vliv dopravy (vozidlo je simulováno samostatně, pouze opět v rychlostním profilu je tento vliv zahrnut díky záznamu reálné jízdy).
- Zohlednit jízdní styl řidiče (agresivnější styl jízdy, delší výběhy atd., také pouze zahrnuto v jednotlivém jízdním profilu z naměřené reálné jízdy).

Simulace probíhá diskrétně s dostatečně malým časovým krokem (typicky 0,1 s), aby zachytila dynamiku vozidla. Model zohledňuje vliv vnějších podmínek, zejména výkonu topení a klimatizace (HVAC) a dalších pomocných pohonů v závislosti na okolní teplotě. Tyto vedlejší příkony jsou implementovány na základě naměřených dat z provozu a odlišeny pro napájení z troleje a z baterie (různé charakteristiky pro oba režimy). Dále model umožňuje nastavit před začátkem simulace počet cestujících (v průběhu simulace neměnný), což ovlivňuje jízdní odpory a potřebný výkon. Samotná trasa jízdy je popsána sekvenčně pomocí úseků s definovanou délkou, maximální povolenou rychlostí a sklonem, a s označením polohy

zastávek či jiných míst, kde může dojít k zastavení (např. křižovatky, přechody). To umožňuje simulovat jízdu vozidla na libovolné trati. Uživatel může zadat reálný zaznamenaný rychlostní profil jízdy pro validaci modelu, nebo definovat trasu a nechat model spočítat průběh rychlosti vozidla v čase podle rychlostních limitů (se zadaným žádaným kladným a záporným zrychlením a polohou zastávek) pro studium hypotetických scénářů. V jednom okamžiku je uvažováno vždy jen jedno vozidlo na trase (bez interakce s dalšími vozidly). Model v aktuální verzi neumožňuje rekuperaci energie do troleje. Ve skutečnosti by bylo možné vrátit malé množství energie (např. 10 %) zpět do napájecí sítě, ale zde se veškerá rekuperovaná energie využije v rámci vozidla nebo promění v teplo.

Celý simulační model naprogramován v Matlabu pomocí objektově orientovaného programování (hlavním stavebním prvkem je třída) a je tvořen sadou vzájemně propojených modulů (objektů tříd), z nichž každý reprezentuje jeden fyzický subsystém vozidla. Klíčové části jsou znázorněny na blokovém schématu na Obrázek 11, který zachycuje tok energie v modelu od kol přes pohonný řetězec až ke zdroji. Jízdní dynamika vozidla (představovaná výpočtem jízdních odporů a zrychlení) určuje potřebnou hnací sílu na kolech, která je přes model převodovky přepočtena na požadovaný moment na hřídeli trakčního motoru. Trakční motor s měničem následně poskytuje či požaduje odpovídající příkon – při jízdě čerpá elektrický výkon ze zdroje, při brzdění naopak generuje výkon rekuperační. Zdroj energie může mít dvě podoby: buď externí trolejové vedení (při jízdě pod trolejí), nebo trakční baterie na palubě vozidla (při jízdě na baterii). V případě trolejového napájení model předpokládá zdroj s rozdílnými dostupnými výkony pro vozidlo stojící a jedoucí, který pokrývá okamžitou spotřebu trakčních i pomocných pohonů. Pokud trolejbus brzdí, do troleje se energie nevrací a veškerá rekuperační se řeší interně. Trakční baterie je v modelu definována kapacitou, aktuálním stavem nabití (SOC) a výkonovými limity. Během jízdy na baterii pokrývá veškerou spotřebu vozidla, naopak při jízdě pod trolejí se může nabíjet (pokud to řídicí logika v dané situaci dovolí). Baterie zahrnuje omezení maximálního vybíjecího i nabíjecího výkonu a účinnosti, a nedovolí překročit hranice vybití či přebití (při dosažení 0 % nebo 100 % SOC). Model dále obsahuje modul sběrače/troleje, který určuje, kdy je vozidlo připojeno k trolejovému napájení, podle toho buď počítá odběr výkonu z troleje, nebo naopak při jízdě na baterii je tento odběr nulový. Modul pomocných pohonů (A100\_AUX) stanovuje aktuální příkon palubních systémů (kompresory, topení, 24V přístroje apod.) podle režimu napájení a venkovní teploty. Tento výkon je odečítán ze zdroje (zatěžuje trolej nebo baterii) a naopak při brzdění představuje

preferenční spotřebič rekurperované energie. Pro maření trakčními motory rekurperované energie při brzdění je v modelu zaveden brzdový odporník, který se automaticky aktivuje, pokud je rekurperovaný výkon vyšší, než kolik dokáže absorbovat baterie a pomocné pohony. Při brzdění rozdělí rekurperační výkon postupně podle priorit na spotřebu pomocných pohonů, nabíjení baterie a zmaření v odporníku, při akceleraci naopak čerpá výkon přednostně z troleje (pokud je k dispozici), nebo z baterie a případně kombinovaně tak, aby byly respektovány limity jednotlivých zdrojů.



Obrázek 11 – “Backward facing” blokové schéma simulačního modelu

Nejdůležitějším prvkem celého modelu je řídicí třída ModelVozidla (v Obrázek 11 představovaná blokem Řídící logika), která v diskretních krocích propojuje všechny zmíněné subsystemy, řeší přepínání režimu napájení a bilanci výkonu a energie mezi nimi a průběžně sleduje stav baterie. Tato třída představuje výpočetní jádro simulace – v každém časovém kroku převezme informace o aktuálním stavu vozidla a trati (okamžitá rychlost, sklon, apod.), vyžádá si výpočty dílčích modulů (jízdni odpory, výkon motoru, změna SOC baterie atd.), a nakonec vypočte výsledné hodnoty (výkony, energie, rychlosti) pro daný simulační krok. Nad tímto jádrem pak stojí třída Simulace, která zajišťuje samotné spuštění a průběh simulace jízdy. Úkolem Simulace je zejména připravit vstupní data (načíst konfiguraci vozidla a parametry trasy, případně načíst rychlostní profil nebo nastavit režim generování jízdniho scénáře), a poté řídit cyklus výpočtu – volat opakovaně ModelVozidla pro každý časový krok, uchovávat a logovat výsledky a po skončení jízdy zajistit jejich další zpracování. Díky tomu model automaticky generuje potřebné výstupy, které lze následně využít k analýze spotřeby energie, dojezdu na baterie, účinnosti rekurperace a dalších provozních ukazatelů.

Třída	Význam třídy
Vozidlo.m a ParametryVozidla.m	Uchovává kompletní technické parametry vozidla (hmotnost, výkony, účinnosti); slouží jako centrální zdroj dat pro ostatní moduly.
Trasy.m	Nese profil tratě (délka, sklon, rychlostní omezení, dostupnost troleje) pro každý úsek simulace.
JizdniOdpor.m	Počítá valivý a aerodynamický odpor (sílu + výkon) z rychlosti, hmotnosti a okolních podmínek.
Prevodovka.m	Přepočítává otáčky / moment mezi koly a motorem podle pevného převodu a účinnosti.
Motor.m	Převádí požadovaný moment na elektrický příkon/rekup. výkon podle účinnostní mapy motoru.
A100_AUX.m	Určuje okamžitý výkon pomocných systémů (HVAC, kompresory ...), závislý na provozních podmínkách.
Baterie.m	Sleduje stav nabití a limity; dodává nebo přijímá výkon, když není nebo nestačí trolej.
BrzdovyOdpor.m	Pohlčuje přebytečnou brzdovou energii jako teplo, když ji nelze rekuperovat do baterie či troleje.
Sberac.m	Modeluje odběr (nebo dobíjení) z trolejového vedení včetně proudových a napěťových limitů.
ModelVozidla.m	V každém kroku řeší backward-facing bilanci: od sil na kolech až po zdroje energie a ztráty.
Simulace.m	Řídí časovou smyčku, volá ModelVozidla, ukládá logy a generuje grafické a numerické výstupy.

Tabulka 4 - Seznam všech tříd v simulačním modelu vozidla

### 2.2.1. Vozidlo.m a ParametryVozidla.m

Funkce ParametryVozidla.m a třída Vozidlo.m společně slouží k popisu veškerých důležitých technických charakteristik trolejbusu pro potřeby simulačního modelu. ParametryVozidla.m funguje jako konfigurace či „databáze“ vozidla, podle zvoleného typu/varianty trolejbusu vrátí konkrétní sadu parametrů (např. hmotnosti, účinnosti, výkony atd.). Tato data následně využívá třída Vozidlo k vytvoření objektu vozidla se všemi potřebnými vlastnostmi. Díky oddělení definice parametrů do samostatného souboru je možné snadno rozšiřovat nebo upravovat model pro různé vozidlové varianty, přidání nové varianty do ParametryVozidla.m automaticky zpřístupní její konfiguraci v simulaci. Třída Vozidlo představuje objekt, který uchovává všechny klíčové technické parametry vozidla potřebné v simulaci. Tento objekt centralizuje informace o vozidle tak, aby ostatní části modelu (výpočet jízdních odporů, model motoru, baterie apod.) mohly kdykoli získat aktuální údaje o vlastnostech vozidla. Vozidlo.m tedy neřeší dynamiku pohybu jako takovou, ale poskytuje vstupní data pro výpočty – podobně jako technický průkaz vozidla v digitální podobě.

## Ukázka kódu Vozidlo.m:

```

classdef Vozidlo
    %%Definice vozidla

    %% Public properties
    properties (Access = public)
        nazevDlouhy = ''; % Dlouhy nazev vozidla (napr. 'Osobni automobil')
        nazevKratky = ''; % Kratky nazev vozidla (napr. 'OA' jako osobni automobil)
        kapacitaAku = 0; % Kapacita akumulatoru [kWh]
        maxPrikonNabijeni = 0; % Maximální nabíjecí příkon [kW]
        maxPrikonVybijeni = 0; % Maximální vybíjecí příkon [kW]
        ucinnostMeniceNabijeni = 0; % Účinnost nabíjecího měniče [-]
        ucinnostTrakceOdber = 0; % Účinnost trakčního pohonu (motor + měnič) při spotřebě energie [-]
    ]

        ucinnostTrakceRekuperace = 0; % Účinnost trakčního pohonu při rekuperaci [-]
        ucinnostBaterieVybijeni = 0; % Účinnost vybití trakční baterie [-]
        ucinnostBaterieNabijeni = 0; % Účinnost nabíjení trakční baterie [-]
        ucinnostAUX = 0; % Účinnost AUX měniče
        pocetNaprav = 0; % Pocet oprav [-]
        delka = 0; % delka vozidla [m]
        mPohot = 0; % Pohotovostní hmotnost vozidla [kg]
        mMax = 0; % Maximální hmotnost vozidla [kg]
        mCelk = 0; % Celková hmotnost = Pohotovostní + pocetOsob
        pocetOsob = 0; % Obsazenost vozidla osobami [-]
        vykon = 0; % Jmenovitý výkon motoru [W]
        pocetMotoru = 0; % Počet motorů [ks]
        koefJizdnichOdporuPrazdny = [0,0,0,0]; % Koeficienty jízdních odporů prázdného vozidla a
        váha (A [N/kN], B [N/kN/(km/h)], C [N/kN/(km/h)^2], m [kg])
        koefJizdnichOdporuLozeny = [0,0,0,0]; % Koeficienty jízdních odporů naloženého vozidla a
        váha (A [N/kN], B [N/kN/(km/h)], C [N/kN/(km/h)^2], m [kg])
        koefZavislostiTeplotaHVAC = [0,0,0,0,0,0]; % Koeficienty křivky závislosti příkonu HVAC na
        teplotě [trolej/baterie] (Ax^2 - Bx + C)
        koefZavislostiTeplotaPP400VAC = [0,0,0,0,0,0]; % Koeficienty křivky závislosti příkonu PP400AC na
        teplotě [trolej/baterie] (Ax^2 - Bx + C)
        koefZavislostiTeplota24V = [0,0,0,0,0,0]; % Koeficienty křivky závislosti příkonu Palubní
        sítě na teplotě [trolej/baterie] (Ax^2 - Bx + C)
        maxVykonTopeni = 0; % Maximální výkon topení [kW]
        maxVykonChlazení = 0; % Maximální výkon chlazení [kW]
        maxVykonPP400VAC = 0; % Maximální výkon PP400VAC [kW]
        maxVykonPalubniSit = 0; % Maximální výkon 24V palubní sítě [kW]
        prevodovy_pomer = 0; % Statický převodový poměr převodovky [-]
        polomer_kola = 0; % Poloměr kola vozidla [m]
        maxAkcelerace = 0; % Maximální akcelerace vozidla [m/s^2]
        maxDecelerace = 0; % Maximální decelerace vozidla [m/s^2]
        limitNabijeniTrolej_W = 0; % Maximální výkon odebíraný ze sběrače při stání [W]
        podilMechBrzd = 0; % Podíl mechanických brzd při rekuperaci [-]

    end

    %% Public methods
    methods (Access = public)
        %% Konstruktor
        function obj = Vozidlo(typVozidla)
            if nargin > 0
                parametry = ParametryVozidla(typVozidla); % Načteme parametry z funkce
                obj = parametry; % Přímé přiřazení načtených parametrů
            end
        end

        function mCelk = VypoctiCelkHmotnost(obj)
            hmotnostCloueka = 75; % [kg]
            mCelk = obj.mPohot + obj.pocetOsob*hmotnostCloueka; % [kg] Celkova hmotnost vozidla
        end
    end
end
end

```

Níže jsou uvedeny hlavní skupiny parametrů, které tato třída obsahuje, a jejich význam:

- **Hmotnost vozidla:** Třída `ParametryVozidla.m` uchovává pohotovostní (prázdnou) hmotnost vozidla a umožňuje zohlednit také hmotnost cestujících. Celková hmotnost se určí ještě před zahájením simulace podle nastaveného počtu cestujících a průměrné hmotnosti jednoho pasažéra (75 kg). Výpočet probíhá dle jednoduchého vztahu  $hmotnost\ vozidla = hmotnost\ prázdného\ vozidla + počet\ cestujících * průměrná\ hmotnost\ cestujícího$ . Tím je zajištěno, že model zohledňuje vyšší hmotnost při plném obsazení vozidla (což významně ovlivňuje jízdní odpory a potřebný výkon).
- **Koeficienty jízdních odporů:** Pro simulaci odporových sil vozidla při jízdě obsahuje objekt koeficienty jízdního odporu označované A [N/kN], B [N/kN/(km/h)], C [N/kN/(km/h)<sup>2</sup>]. Tyto koeficienty odpovídají jednotlivým složkám odporu, zejména valivému odporu pneumatik a aerodynamickému odporu vzduchu (který roste s druhou mocninou rychlosti). V `ParametryVozidla.m` jsou tyto hodnoty definovány zvlášť pro prázdné a pro plně obsazené vozidlo. Třída `Vozidlo` je uchovává a při výpočtech se mezi těmito dvěma stavy lineárně interpoluje podle aktuální hmotnosti. Díky tomu model v každém okamžiku realisticky stanoví jízdní odpory pro dané zatížení vozidla a rychlost. Správné vyčíslení sil valivého a aerodynamického odporu je zásadní pro určení požadované hnací síly na kolech a tím i potřebného výkonu motoru v rámci backward-facing simulace.
- **Výkonové limity a kapacity:** Objekt vozidla dále nese informace o maximálních výkonech a výkonnostních omezeních jednotlivých částí pohonu. Patří sem například maximální výkon trakčního motoru a jejich počet. V případě parciálního trolejbusu jsou klíčové také parametry spojené se zdroji energie, využitelná kapacita trakční baterie v kWh a výkonové limity pro její nabíjení/vybíjení. Model tak zná maximální elektrický výkon, jaký lze z baterie odebírat při jízdě na baterii, i největší možný výkon rekuperace, který je baterie schopna pojmout při brzdění. Podobně je zde i omezení odběru výkonu z troleje pro nabíjení trakční baterie. Tyto limity zajišťují, že simulace respektuje reálné konstrukční hranice – např. neumožní překročit výkon, na který je dimenzován pohon nebo příslušný zdroj energie.
- **Účinnost měničů a systémové ztráty:** V reálném vozidle dochází při přeměně energie k určitým ztrátám, třída `Vozidlo` proto zahrnuje i účinnosti vybraných komponent. Je zde uložena účinnost palubních pomocných měničů (měničů napájejících pomocné systémy

vozidla). Tato účinnost určuje, jaká část energie se při převodu například z trolejového napětí na napětí pro pomocné obvody ztratí ve formě tepla. Zahrnutí účinností do modelu umožňuje lépe odhadnout skutečnou spotřebu. Kromě pomocných okruhů mohou být podobně zohledněny i účinnosti dalších částí pohonu, např. účinnost měniče trakčního. Všechny tyto parametry pomáhají modelu rozlišit, kolik energie se skutečně dostává do pohybu vozidla a kolik se ztrácí.

- Příkon HVAC a ostatních pomocných systémů: Do technických parametrů vozidla patří také charakteristiky vedlejších (palubních) spotřebičů, zejména systému vytápění a klimatizace (HVAC). Třída `Vozidlo` uchovává jednak maximální hodnoty příkonu HVAC pro topení i chlazení (ty představují horní hranice, kolik elektrického výkonu mohou topné těleso nebo klimatizační jednotka odebírat), a jednak koeficienty polynomů popisující, jak se aktuální příkon těchto systémů mění v závislosti na vnější teplotě. V modelu je totiž provoz topení/klimatizace simulován dynamicky, např. při velmi nízkých venkovních teplotách se topení může blížit svému maximu, zatímco za mírného počasí je odběr podstatně nižší. U každé skupiny pomocných systémů je zde zadán rovněž i jejich maximální výkon.

Ve shrnutí, `Vozidlo.m` plní roli datového nosiče všech podstatných parametrů vozidla, čímž umožňuje ostatním modulům simulace (jízdni odpory, motor, baterie atd.) pracovat se zadanými o vozidle respektující technické vlastnosti vozidla. Pokud bychom chtěli simulovat jiný typ vozidla, stačí do `ParametryVozidla.m` vytvořit nový case a doplnit jeho parametry (hmotnosti, výkony, kapacitu baterie apod.) a funkce `ParametryVozidla.m` pak vytvoří odpovídající objekt. Tento způsob návrhu zvyšuje přehlednost modelu – veškeré změny technických údajů vozidla se provedou na jednom místě, aniž by bylo nutné zasahovat do kódu ostatních částí simulace. To je výhodné jak pro správnost a údržbu kódu, tak pro možnost rozšiřovat model o nové scénáře a vozidla.

### 2.2.2. `Trasy.m`

Třída `Trasy` představuje samostatný modul simulačního modelu, který slouží k uchování a poskytování všech relevantních informací o trase, po které se parciální trolejbus pohybuje. Do tohoto bloku jsou soustředěny parametry definující profil tratě, zejména členění trasy na úseky s definovanou délkou, sklonem a dalšími atributy, údaje o přítomnosti trolejového vedení (tj. zda vozidlo může v daném místě odebírat energii z troleje či nikoliv) a doplňující informace

jako rychlostní omezení na úsecích nebo místa plánovaných zastavení (Tabulka 2). Třída Trasy tak v rámci modelu zastává roli datového nosiče popisu tratě, podobně jako třída Vozidlo nese technické parametry vozidla a tím centralizuje popis trasy do jednoho místa. Ostatní části simulačního programu (jízdní odpory, sběrač, model vozidla aj.) z tohoto modulu průběžně získávají potřebné údaje o aktuálním úseku jízdy (sklon vozovky, dostupnost trolejového vedení apod.), aniž by samy musely řešit načítání či ukládání těchto dat. Tím je zajištěno, že změna trasy (např. pro simulaci jiné linky) nevyžaduje úpravy v kódu ostatních komponent, ale postačí připravit nový soubor s popisem požadované trasy, který třída Trasy načte. Konkrétní data o trase jsou uložena v podrobné tabulce úseků, která je vytvořena na základě mapových dat a údajů o dané lince. Při inicializaci simulace dojde k načtení této tabulky – buď přímo z externího souboru (Excel s parametry trasy), nebo je využito předzpracovaných dat (uložených při prvním načtení trasy z Excel souboru do binárního \*.mat souboru) pro urychlení opakovaných běhů simulace (viz. Kapitola 2.1.2).

Díky tomu lze model snadno přizpůsobit libovolné trase změnou vstupního souboru, aniž by bylo třeba zasahovat do zdrojového kódu. Tabulka trasy typicky popisuje jeden směr linky (v případě linky č. 59 samostatně směr Letiště → Nádraží Veleslavin a opačně), přičemž uživatel může zvolit, který z těchto směrových profilů se má pro simulaci použít. Každá řádka tabulky odpovídá jednomu úseku trasy mezi dvěma definovanými body (hranice úseků jsou voleny podle zastávek, výrazných změn sklonu, rychlostních limitů atd.).

Ukázka z Tabulka 2 pro lepší orientaci ve struktuře XLSX souboru trasy:

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod, popis	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]	Zastavení na začátku úseku [ano/ne]
0	stání pro trolejbus	362	80	1,250	ne	20	ano
0,08	výjezd na ulici Schengenská	363	130	-0,769	ne	50	ano
0,21	přechod pro chodce	362	290	0,690	ne	50	ano
0,5	ostré odbočení vlevo - začátek	364	70	0,000	ne	50	ne
0,57	ostré odbočení vlevo - konec	364	253	-0,790	ne	50	ne

Třída Trasy nabízí několik funkcí pro práci s datovými daty:

### 1. Konstruktor (Trasy)

- Konstruktor načítá data z Excelového souboru s trasovými informacemi. Pokud je již dostupný odpovídající .mat soubor, využije tento rychlejší formát. V opačném případě jsou data načtena z Excelu, upravena a následně automaticky uložena do .mat souboru pro rychlejší příští načtení.

- Pokud uživatel nezadá explicitně název souboru, MATLAB otevře dialog pro jeho výběr, čímž se zajistí intuitivní použití bez nutnosti přímé editace kódu.

#### 2. Funkce `data = nactiData(~, nazev_souboru)`

- Tato funkce načítá data z Excelového souboru, počínaje řádkem, kde jsou uloženy samotné datové položky. Následně upraví názvy sloupců odstraněním diakritiky a převede textové informace typu „ano“ a „ne“ na logické hodnoty 1 a 0, což výrazně zjednodušuje následné výpočty v simulačním modelu.

#### 3. Funkce `ulozDoMat(~, nazev_mat, data)`

- Funkce umožňuje uložení načtených dat do .mat formátu. Tato optimalizace výrazně zrychluje načítání dat při dalším použití simulačního modelu, neboť eliminuje nutnost opakovaně načítat velké množství dat z Excelu.

#### 4. Funkce `[sklon, trolej, max_rychlost] = zjistInformace(obj, vzdalenost)`

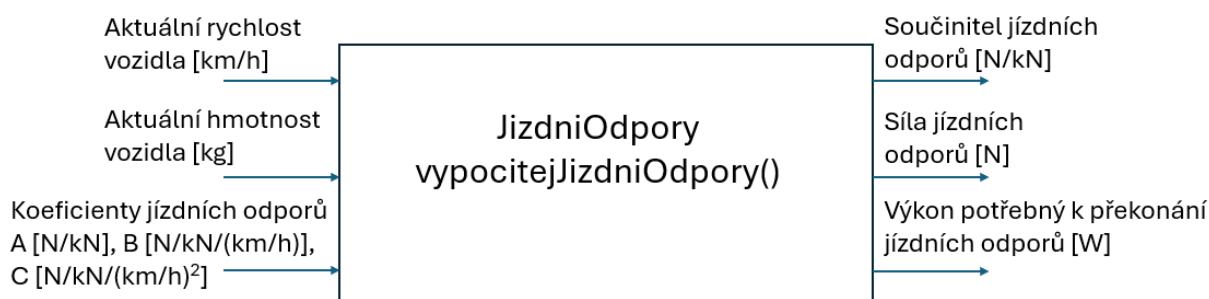
- Na základě aktuální kilometrické polohy vozidla funkce vrací tři důležité parametry:
  - Sklon vozovky v procentech, který má přímý dopad na výpočet jízdních odporů a tím na trakční výkon vozidla.
  - Přítomnost trolejového vedení (logická hodnota), určující aktuální režim napájení vozidla, zda může být energie odebírána ze sběrače, nebo zda je vozidlo odkázáno na energii z trakční baterie.
  - Maximální povolenou rychlost, která ovlivňuje dynamiku jízdy a průběh simulace v režimu simulace „Dynamický“.

Metoda pečlivě kontroluje, zda jsou všechna potřebná data v tabulce dostupná, čímž je zajištěna robustnost a spolehlivost simulace. V případě neúplných dat jsou nastaveny výchozí hodnoty, čímž model předchází možným chybám a nesrovnalostem.

### 2.2.3. **JizdniOdpor.m**

Třída `JizdniOdpor` reprezentuje jízdní odpory vozidla v simulačním modelu parciálního trolejbusu. Slouží k výpočtu vozidlových jízdních odporů (valivý odpor a aerodynamický odpor), které při jízdě působí proti pohybu vozidla. Tyto složky dohromady

určují, jak velkou sílu musí pohonný systém překonat při jízdě konstantní rychlostí při nulovém sklonu. Jízdní odpory obecně zahrnují i odpor svahu (daný složkou tíhy do sklonu trasy) a setrvačné síly při zrychlení či zpomalení, tyto komponenty však model počítá odděleně. Úkolem třídy JizdniOdpory je tedy vypočítat valivý a aerodynamický odpor na základě aktuální hmotnosti vozidla a rychlosti jízdy. Výstupem je okamžitá síla  $F_0$  [N] působící proti pohybu a odpovídající výkon  $P_0$  [W] nutný k jejímu překonání. Díky zahrnutí aktuální hmotnosti a rychlosti do výpočtu jsou jízdní odpory stanoveny realisticky pro každou situaci během simulace. Správné určení těchto odporových sil je zásadní, neboť spolu s odporem do stoupání a případnou setrvačnou silou určují výsledný požadavek na hnací sílu a výkon motoru.



Obrázek 12 - Blokové schéma třídy JizdniOdpory

Blokové schéma (Obrázek 12) znázorňuje vstupy a výstupy této třídy: vstupem je aktuální rychlost vozidla  $v$  [km/h] a parametry z objektu `Vozidlo` (aktuální hmotnost vozidla a koeficienty jízdních odporů pro prázdný/plně ložený stav). Výstupem je vypočtená výsledná síla jízdních odporů  $F_0$  [N], kterou musí vozidlo překonávat, a tomu odpovídající výkon  $P_0$  [W]. Třída dále vrací i součinitel jízdního odporu  $f_0$  [N/kN], jenž vyjadřuje celkové odporové síly vztažené na jednotku hmotnosti.

Třída má dva základní atributy. Prvním je konstanta  $g = 9,81$  [m·s<sup>-2</sup>] představující gravitační zrychlení. Druhým atributem je vozidlo, což je instance třídy `Vozidlo` obsahující veškeré relevantní parametry konkrétního trolejbusu (včetně hmotností a koeficientů jízdních odporů). Dále třída definuje dvě vlastnosti – `G_prazdny` a `G_lozeny` – které představují tíhovou sílu prázdného a plně loženého vozidla. Tyto veličiny se počítají automaticky z hodnot hmotností uložených v parametrech vozidla, pro prázdnou hmotnost  $m_{prázdný}$  a plnou hmotnost  $m_{ložený}$  (obě v kg) se tíhové síly získají jako  $G_{prázdný} = m_{prázdný} * g$  a  $G_{ložený} = m_{ložený} * g$  (výsledná jednotka je kN). Tyto veličiny slouží při výpočtu aktuální odporové síly.

Při vytváření objektu *JizdniOdpory* je konstruktoru předána instance třídy *Vozidlo*. Konstruktor zajistí uložení odkazu na tento objekt, aby byly dostupné jeho parametry – zejména koeficienty jízdního odporu  $A$  [N/kN],  $B$  [N/kN/(km/h)],  $C$  [N/kN/(km/h)<sup>2</sup>] pro prázdné a plně obsazené vozidlo a definované hmotnosti vozidla. Tím je třída připravena počítat jízdní odpory konkrétního vozidla.

Pro výpočet okamžitých jízdních odporů slouží hlavní metoda třídy metoda  $[f\theta, F\theta, P\theta] = \text{vypocitejJizdniOdpory}(\text{obj}, v)$ , jejímž vstupem je aktuální rychlost vozidla  $v$  (udávaná v [km/h]). Tato metoda vrací trojici veličin  $[f\theta, F\theta, P\theta]$ , které charakterizují jízdní odpory při dané rychlosti. Nejprve si metoda zjistí aktuální celkovou hmotnost vozidla  $m_{\text{aktual}}$  (uloženou v objektu vozidlo jako parametr  $m_{\text{celk}}$  – tato hodnota zohledňuje i případnou hmotnost cestujících). Dále načte z objektu vozidlo hodnoty koeficientů jízdního odporu pro prázdné ( $A_{\text{prazdny}}$ ,  $B_{\text{prazdny}}$ ,  $C_{\text{prazdny}}$ ) a plně ložené vozidlo ( $A_{\text{lozeny}}$ ,  $B_{\text{lozeny}}$ ,  $C_{\text{lozeny}}$ ). Tyto parametry jsou definovány v *ParametryVozidla.m* zvlášť pro oba stavy vozidla. K nim odpovídajícím způsobem patří hmotnosti prázdného ( $m_{\text{prazdny}}$ ) a loženého vozidla ( $m_{\text{lozeny}}$ ). Na základě aktuální hmotnosti  $m_{\text{aktual}}$  se vypočte interpolační faktor  $w$  vyjadřující poměr zatížení vozidla mezi prázdným (0) a plným (1) stavem:

$$w = \frac{m_{\text{aktualni}} - m_{\text{prazdny}}}{m_{\text{lozeny}} - m_{\text{prazdny}}} \quad (1)$$

Tato hodnota  $w$  je případně omezena do intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$  (pokud by aktuální hmotnost ležela mimo rozsah prázdné až plné, je  $w$  omezeno). Následně metoda lineárně interpoluje hodnoty koeficientů jízdního odporu pro aktuální hmotnost:

$$A = (1 - w) * A_{\text{prazdny}} + w * A_{\text{lozeny}} \quad (2)$$

$$B = (1 - w) * B_{\text{prazdny}} + w * B_{\text{lozeny}} \quad (3)$$

$$C = (1 - w) * C_{\text{prazdny}} + w * C_{\text{lozeny}} \quad (4)$$

, kde  $A$  [N/kN],  $B$  [N/kN/(km/h)],  $C$  [N/kN/(km/h)<sup>2</sup>]

Stejným poměrem se určí také tíhová síla při aktuální hmotnosti  $G$ . Jelikož tíha roste přímo úměrně s hmotností, lineární interpolace mezi  $G_{\text{prazdny}}$  a  $G_{\text{lozeny}}$  dává výsledně:

$$G = (1 - w) * G_{prázdný} + w * G_{ložený} \quad (5)$$

, kde  $G$  [kN]

Po stanovení interpolovaných koeficientů spočte metoda součinitel jízdního odporu vozidla  $f_0$  [N/kN] podle kvadratického vztahu:

$$f_0 = A + B * v + C * v^2 \quad (6)$$

, kde  $v$  je aktuální rychlost jízdy ( $v$  [km/h]). Výsledný součinitel  $f_0$  má jednotku [N/kN] a udává celkovou odporovou sílu přepočtenou na jednotku tíhy 1 kN. Pro získání skutečné síly jízdních odporů  $F_0$  [N] metoda vynásobí součinitel  $f_0$  aktuální tíhovou silou vozidla  $G$  ( $v$  kN):

$$F_0 = f_0 * G \quad (7)$$

, čímž obdrží celkovou odporovou sílu působící proti pohybu vozidla. Z ní se následně určí požadovaný výkon  $P_0$  [W] nutný k udržení (nebo překonání) těchto odporů při dané rychlosti. Výkon je dán součinem síly a rychlosti, proto metoda vynásobí sílu  $F_0$  [N] aktuální rychlostí [m/s]:

$$P_0 = F_0 * v_{m/s} \quad (8)$$

, kde  $v_{m/s}$  je rychlost převedená z [km/h] na [m/s]  $v_{m/s} = v/3,6$ . Tím získáme okamžitý výkon potřebný k překonání jízdních odporů při rychlosti  $v$ . Metoda `vypocitejJizdniOdporu` vrací hodnoty  $f_0$ ,  $F_0$ ,  $P_0$  jako výstup, které lze dále využít v modelu.

Vypočtené jízdní odpory se v další části simulace kombinují s jinými silami ovlivňujícími pohyb vozidla. Zejména se k síle  $F_0$  přičítá složka odporu ze sklonu (pokud trať stoupá či klesá) a setrvačná síla spojená s požadovaným zrychlením nebo zpomalením vozidla. Teprve součtem valivého odporu, aerodynamického odporu, odporu svahu a setrvačné složky získá model celkovou nutnou hnací sílu  $F_{nutna}$  pro daný jízdní režim.

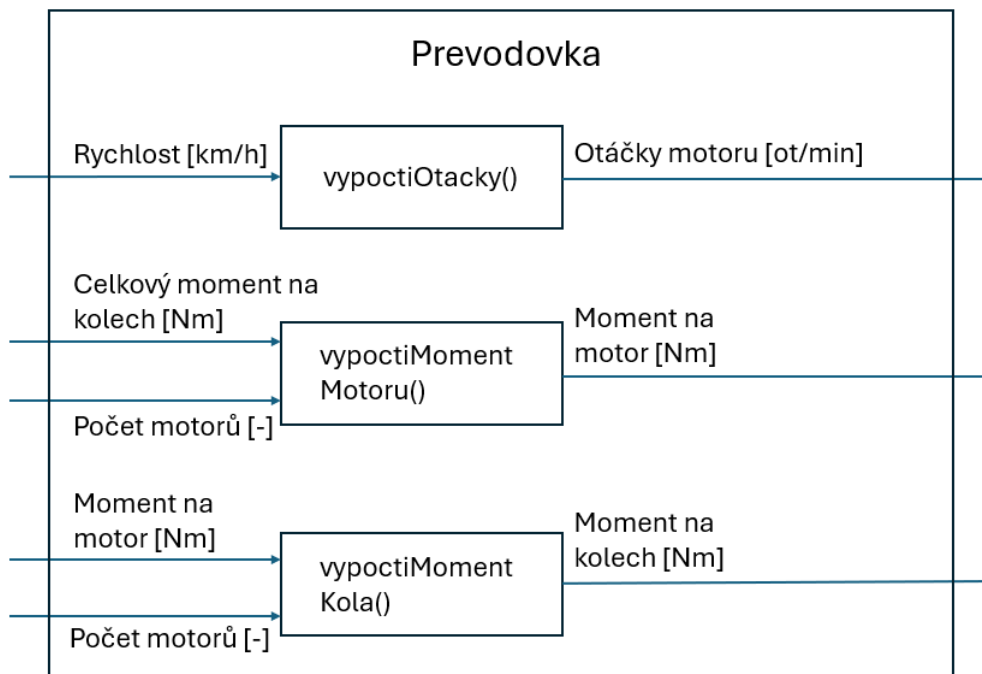
#### 2.2.4. Prevodovka.m

Další součástí vytvořeného simulačního modelu je třída `Prevodovka`, která reprezentuje stálý převod mezi trakčním motorem a hnacími koly vozidla. Slouží k převodu kinematických veličin mezi kolem a motorem, zejména k výpočtu otáček motoru na základě dané rychlosti vozidla. Současně platí, že přes definovaný převodový poměr a účinnost ovlivňuje i přepočet krouticího momentu a toku výkonu mezi motorem a koly.

Třída obsahuje následující parametry, které určují její chování:

- `prevodovy_pomer [-]`: Poměr otáček motoru vůči otáčkám kola. Udává, kolikrát rychleji se otáčí hřídel motoru vůči kolům. Hodnota převodového poměru je definovaná v `ParametryVozidla`.
- `polomer_kola [m]`: Poloměr hnacího kola vozidla. Tento parametr slouží k převodu rychlosti vozidla na úhlovou rychlost kola. Menší poloměr kola vede při dané rychlosti k vyšší úhlové rychlosti, a tím i vyšším otáčkám motoru. I zde je jeho hodnota definovaná v `ParametryVozidla`.
- `ucinnost [-]`: Pevná mechanická účinnost převodovky, vyjadřující poměr přeneseného výkonu mezi motorem a koly. V tomto modelu je účinnost konstantní pro celý rozsah (nezávislá na zatížení či otáčkách) s hodnotou 0,97.

Třída `Prevodovka` má definován konstruktor, který umožňuje vytvoření objektu s požadovanými parametry převodu. Konstruktor přijímá vstupní argumenty pro převodový poměr a poloměr kola a při inicializaci je uloží do odpovídajících vlastností objektu.



Obrázek 13 - Blokové schéma třídy `Prevodovka`

Nejdůležitější metodou třídy `Prevodovka` je funkce `vypoctiOtacky`, která provádí výpočet otáček motoru na základě aktuální rychlosti vozidla. Tato metoda očekává na vstupu

aktuální rychlost vozidla v km/h. Výstupem je vypočtená hodnota otáček motoru v otáčkách za minutu.

Při volání `otacky_motoru = vypoctiOtacky(obj, rychlost_kmh)` probíhá výpočet krok za krokem takto:

1. Kontrola vstupů: Pokud je zadaná rychlost záporná, metoda ji ořeže na nulu (záporná rychlost nedává fyzikální smysl v rámci modelu jízdy). Dále se ověří, že převodový poměr není nula (nulový převod by znemožnil výpočet), v případě nulové hodnoty poměru metoda vyvolá chybu.
2. Převod rychlosti na m/s: Vstupní rychlost vozidla v km/h se převede na metry za sekundu vztahem:

$$v = \frac{v_{km}}{3,6} \quad (9)$$

, kde  $v$  je rychlost v m/s.

3. Výpočet úhlové rychlosti kol: Z výsledné rychlosti se vypočte úhlová rychlost kola (radiány za sekundu) podle vzorce:

$$\omega_{kola} = \frac{v}{r_{kola}} \quad (10)$$

, kde  $r_{kola}$  je poloměr kola [m].

4. Výpočet otáček kola: Úhlová rychlost kola se převede na otáčky kola [ot/min]:

$$n_{kola} = \omega_{kola} * \frac{60}{2\pi} \quad (11)$$

5. Výpočet otáček motoru: Otáčky kola se vynásobí převodovým poměrem  $i$  za účelem získání otáček motoru:

$$n_{motor} = n_{kola} * i \quad (12)$$

Tím se zohlední skutečnost, že motor se točí  $i$  -krát rychleji než kola (pro  $i > 1$ ), nebo naopak pomaleji (pro  $i < 1$ , což by odpovídalo převodu do pomala).

Výsledkem metody `vypoctiOtacky` je tedy odpovídající rychlost otáčení motoru (v ot/min) pro danou rychlost vozidla.

Ačkoliv třída *Prevedovka* explicitně počítá otáčky, její převodový poměr a účinnost se využívají také při převodu momentů a výkonů mezi motorem a kolem. V ideálním případě (bez ztrát) platí zákon zachování výkonu, kdy motor dodává kolům stejný mechanický výkon (součin momentu a úhlové rychlosti). S účinností převodovky  $\eta_{převodovky} < 1$  se však část výkonu ztrácí. Krouticí moment na kolech  $M_{kola}$  [Nm] a moment na hřídeli motoru  $M_{motor}$  [Nm] pak splňují vztah:

$$M_{kola} = M_{motor} * i * \eta_{převodovky} \quad (13)$$

, kde  $i$  je převodový poměr a  $\eta_{převodovky}$  je účinnost převodovky [-]. Z tohoto důvodu musí trakční motor v režimu pohonu vyvinout vyšší moment než je požadovaný moment na kolech, konkrétně:

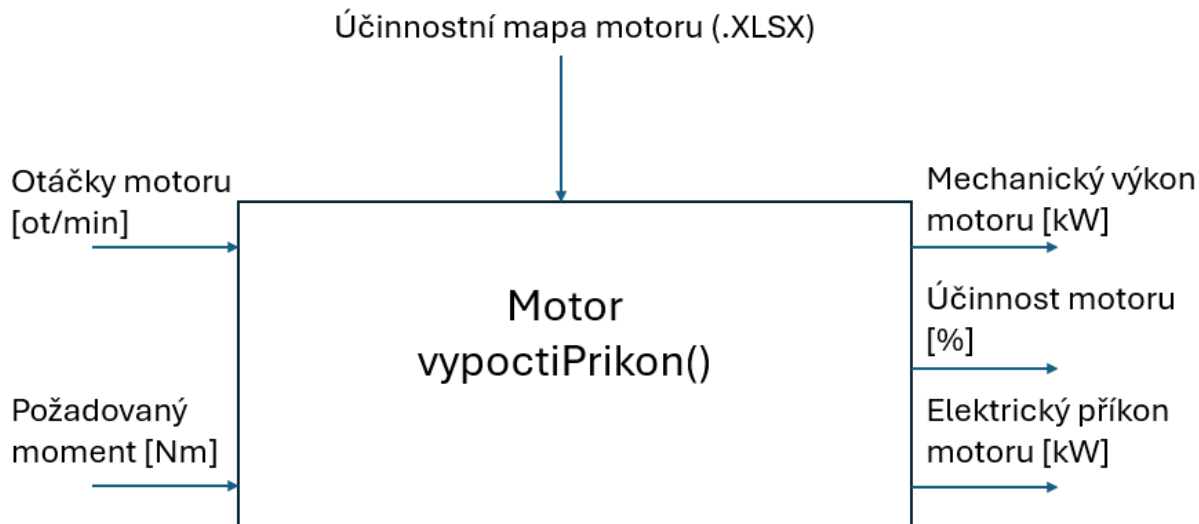
$$M_{motor} = \frac{M_{kola}}{i * \eta_{převodovky}} \quad (14)$$

Tato rovnice platí pro zpětný výpočet potřebného momentu motoru na základě požadavku na moment (resp. tažnou sílu) na kolech. V rámci backward-facing simulace se právě tímto způsobem určuje, jaký moment (a výkon) má motor dodat, aby překonal jízdní odpory působící na kola.

### 2.2.5. Motor.m

Třída *Motor* představuje model trakčního elektromotoru vozidla a v rámci “backward-facing” logiky simulačního modelu slouží k převodu požadavku na mechanický výkon (na hřídeli motoru) na odpovídající elektrický příkon odebraný ze zdroje nebo naopak vrácený do vozidla. Vstupem této třídy jsou aktuální otáčky motoru  $otacky$  [rad/s] a požadovaný moment  $moment$  [Nm] na hřídeli motoru, které vypočte nadřazený model vozidla (třída *ModelVozidla*) na základě jízdních odporů, dynamiky pohybu a parametrů převodovky. Pro Škoda-Solaris 24m je požadovaný moment na kola rozdělen rovným dílem mezi oba motory, kterými vozidlo disponuje, takže každý motor obdrží jako vstup moment odpovídající svému podílu. Výstupem třídy *Motor* je vypočtený mechanický výkon  $vykon\_mech$  [kW] na hřídeli motoru a zejména elektrický příkon  $prikon$  [kW], který musí být v daném okamžiku dodán motoru z baterie či troleje (případně vrácen do baterie při rekuperaci). Kromě toho třída může poskytovat i informaci o okamžité účinnosti  $ucinnost$  [-] motoru. Motor tak v modelu propojuje

mechanickou a elektrickou doménu pohonu, kdy na základě požadovaného momentu a otáček určí, jak velký elektrický výkon je potřeba ze zdroje dodávat (nebo do něj vracet).



Obrázek 14 - Blokové schéma třídy Motor

Při vytvoření objektu `Motor` (volání konstruktoru) se načte tabulková účinnostní mapa elektromotoru z externího datového souboru (formát XLSX). Tato mapa obsahuje sadu bodů charakteristiky motoru získaných z technických dat výrobce. Data jsou organizována ve sloupcích: otáčky [ot/min], moment [Nm], účinnost [%] a mechanický výkon [kW]. Konstruktor uloží celou tabulku do vlastnosti objektu a následně z ní odvodí další potřebné informace. Z množiny hodnot otáček v tabulce jsou odvozeny unikátní hladiny otáček a pro každou z nich je určen maximální dosažitelný moment čímž vzniká matice maximálního momentu v závislosti na otáčkách (limitní momentová charakteristika motoru). Tato informace se dále využívá mimo třídu `Motor` (ve třídě `ModelVozidla`) pro případné omezení požadovaného momentu. Z tabulky je také přímo získán maximální mechanický výkon motoru (typicky dosažený v oblasti přechodu z konstantního momentu na konstantní výkon). Dále konstruktor připraví interpolace pro účinnost a výkon pomocí objektů typu `scatteredInterpolant` – ty umožní plynule odhadovat hodnoty `ucinnost` a `vykon_mech` i pro body mezi zadanými datovými body mapy. Interpolace pracuje nad nepravidelnou sítí bodů (otáčky, moment) s metodou lineární interpolace a využitím nejbližšího známého bodu pro extrapolaci mimo rozsah mapy. Tím je zajištěno, že při dotazu na účinnost nebo výkon pro libovolnou kombinaci otáček a momentu vrátí model smysluplnou hodnotu, a to i v případě, kdy požadavek mírně překročí oblast pokrytou tabulkovými daty (hodnota se pak ustálí na nejbližší dostupné hranici).

Stěžejní metodou třídy je funkce [prikon, vykon\_mech, ucinnost] =vypoctiPrikon(otacky, moment), která na základě zadaných otáček motoru ( $\omega$ ) a požadovaného momentu (M) vrátí trojici hodnot – elektrický příkon  $P_{el}$ , mechanický výkon  $P_{mech}$  a účinnost  $\eta$ . Hned na počátku tato metoda ošetří, aby vstupní hodnoty nepřekročily fyzické limity motoru dané mapou: pokud jsou požadované otáčky vyšší než maximální otáčky v mapě, jsou omezeny na toto maximum, a obdobně pokud je požadovaný moment vyšší než největší moment v mapě, dojde k oříznutí na tuto maximální hodnotu. V samotné třídě Motor se neomezuje moment podle křivky maximálního momentu motoru v závislosti na otáčkách, toto zajišťuje až třída ModelVozidla. Dále metoda ošetřuje mezní případ nulových otáček nebo nulového momentu. Pokud  $\omega = 0$  nebo  $M = 0$ , vrátí  $P_{mech} = 0$ ,  $P_{el} = 0$  (motor nevykonává práci ani neodebírá příkon, zanedbáváme magnetizační proud do motoru) a účinnost je nulová (protože není definována smysluplně při nulovém zatížení). Ve standardním případě se nejprve vypočte mechanický výkon na hřídeli motoru jako součin momentu a úhlové rychlosti:

$$P_{mech} = M * \omega \quad (15)$$

, kde  $P_{mech}$  je v jednotkách wattů (ve výpočtu se následně převádí na kW). Z tabulky účinností se pomocí interpolace zjistí odpovídající účinnost  $\eta$  pro danou kombinaci otáček a momentu (hodnoty v mapě jsou uloženy v procentech, proto se dělí 100 pro získání poměrové účinnosti). V případě, že by interpolace vrátila nedefinovanou nebo extrémně nízkou účinnost (například mimo rozsah mapy), je ošetřeno, aby nedošlo k numericky chybnému výpočtu, pokud  $\eta < 0,01$ , metoda raději vrátí nulový příkon (simuluje situaci, kdy motor při daných podmínkách nelze využít). Pro běžné platné hodnoty však pokračuje výpočet elektrického příkonu. Ten se liší podle režimu činnosti motoru:

- **Motorický režim (pohon):** Pokud je požadován kladný moment a motor odvádí mechanický výkon (tj.  $P_{mech} \geq 0$ ), je nutné dodat elektrický výkon větší o ztráty. Platí vztah:

$$P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} \quad (16)$$

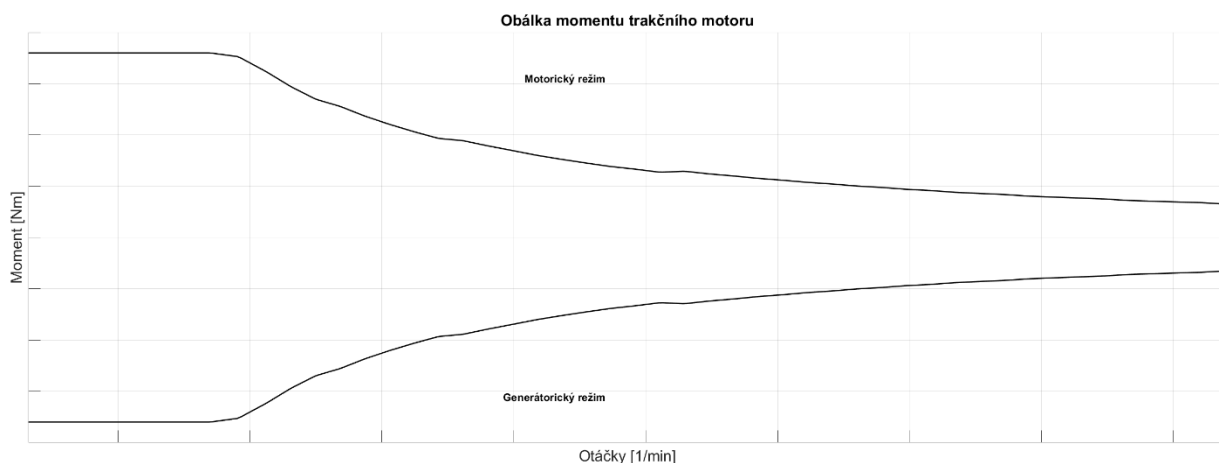
, kde  $P_{el}$  [kW] je elektrický příkon odebíraný z baterie nebo troleje a  $\eta$  [-] účinnost motoru (při daném bodu).

- **Generátorický režim (rekuperace):** Pokud působí na hřídeli brzdny moment a motor pracuje jako generátor (tj.  $P_{mech} < 0$ , záporný výkon značí tok energie z kol do motoru), opačným směrem se část výkonu ztrácí a do elektrického obvodu se vrací jen jeho část. V modelu se předpokládá stejná hodnota účinnosti  $\eta$  i pro generátorický mód, ale vzorec se upraví tak, že:

$$P_{el} = P_{mech} * \eta \quad (17)$$

, kde výsledné  $P_{el}$  bude záporné (značí výkon dodávaný do baterie či ostatních systémů). Z pohledu modelu je tak rekuperace o něco méně efektivní než jízda, protože stejně jako ve skutečnosti, kde při zpětné přeměně mechanické energie na elektrickou vznikají tepelné ztráty.

Takovýto způsob uplatnění účinnostní mapy znamená, že mapa platí primárně pro motorický režim (údaje výrobce zpravidla udávají účinnost motoru při jeho pohonu) a v generátorickém režimu je využita stejná hodnota účinnosti jako při odpovídajícím zatížení v motorickém směru (Obrázek 15). Model tedy neuvažuje zvláštní účinnost pro rekuperaci, pro zjednodušení předpokládá víceméně symetrické charakteristiky motoru. Režim (pohon vs. generátor) je v kódu jednoznačně určen znaménkem vypočteného  $P_{mech}$  (případně momentu): kladný výkon značí odběr energie, záporný výkon její vracení. V rámci celého simulačního modelu se pak takto vypočtený elektrický příkon  $P_{el}$  předává dále, buď jako požadavek na baterii (v režimu jízdy na baterii), nebo jako odběr z troleje (pokud je vozidlo pod trolejovým vedením). Při brzdění se záporný  $P_{el}$  interpretuje jako rekuperační výkon dostupný pro pomocné spotřeby vozidla a nabíjení baterie. Třída Motor sama tedy neřeší limitace rekuperace, pouze vypočte potenciálně dostupný generovaný výkon a o rozdělení energie mezi pomocné spotřeby, baterii, odporník a mechanické brzdy se stará nadřazená logika třídy ModelVozidla.



Obrázek 15 - Účinnostní mapa motorického a generátorického režimu motoru

**Shrnutí:** Třída Motor funguje jako modul převádějící požadavek na krouticí moment na hřídeli motoru na odpovídající energetické toky. V každém časovém kroku simulace přijme od modelu vozidla hodnoty otáček motoru (dány aktuální rychlostí vozidla a převodem) a požadovaného momentu (dán jízdni situací), z tabulky odhadne aktuální účinnost a vrátí mechanický a elektrický výkon. V konstruktoru načtená účinnostní mapa umožňuje získat data o reálné charakteristice motoru (včetně poklesu momentu při vyšších otáčkách), která jsou poté použita v nadřazené části modelu (třída ModelVozidla). Tím se do simulace promítá realistická účinnost motoru, samotné omezení motoru vyhodnocuje třída ModelVozidla. Účinnost trakčního měniče (střídače) není v této třídě zavedena samostatně, ale je započítávána v ModelVozidla při počítání s příkony motorů.

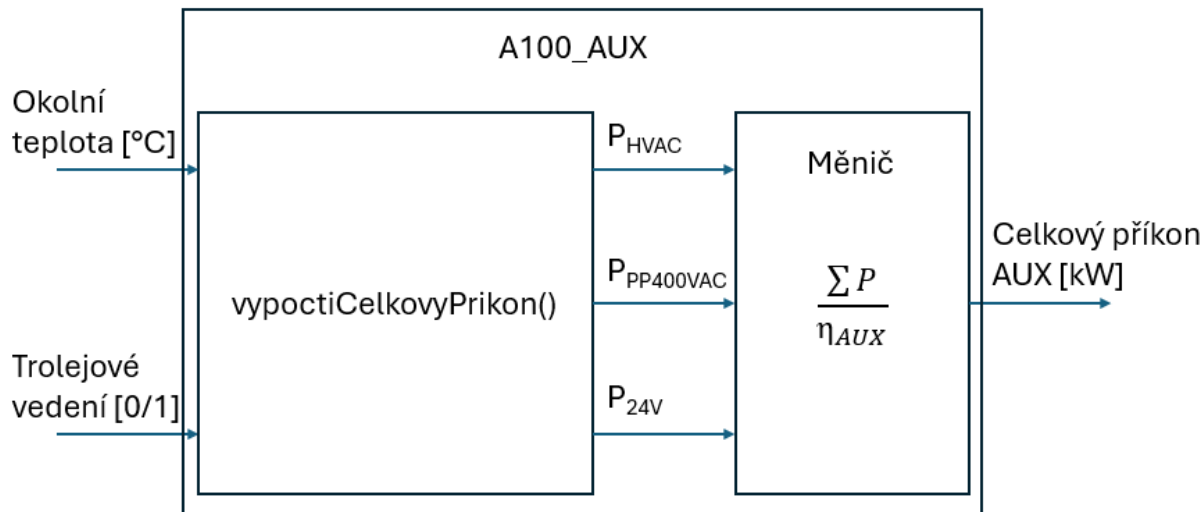
### 2.2.6. A100\_AUX.m

Třída A100\_AUX slouží k výpočtu celkového příkonu pomocných spotřebičů trolejbusu. Zahrnuje:

- Příkon klimatizačního systému (topení/klimatizace – HVAC) v závislosti na okolní teplotě a provozním režimu napájení vozidla (jízda pod trolejí vs. jízda na baterie)
- Příkon pomocných pohonů 3x400 VAC/50 Hz v závislosti na okolní teplotě a provozním režimu napájení vozidla (jízda pod trolejí vs. jízda na baterie)
- Příkon 24 VDC sítě v závislosti na okolní teplotě a provozním režimu napájení vozidla (jízda pod trolejí vs. jízda na baterie)

Díky tomu model simuluje, že při nízkých venkovních teplotách roste elektrický příkon topení a při vysokých teplotách roste příkon klimatizace, zatímco v mírných podmínkách je

spotřeba HVAC minimální. Režim napájení přitom ovlivňuje, jak jsou pomocné systémy provozovány, například při jízdě na baterii může být jejich výkon omezen kvůli šetření energie (Graf 7). Celkový vypočtený příkon z této třídy se pak v rámci simulačního toku přičítá k odběru z napájecí soustavy nebo odečítá z baterie vozidla.



Obrázek 16 - Blokové schéma třídy A100\_AUX

Hlavní metodou je `vypoctiCelkovyPrikon(obj)`, která na základě vstupů vypočítá aktuální celkový příkon pomocných spotřebičů. Vstupy této metody jsou: aktuální okolní teplota `okolniTeplota [°C]` a příznak trolejového vedení podTroleji (boolean). Tyto vstupy předává nadřazená třída `ModelVozidla` při každém výpočetním kroku simulace. Výstupem metody je celkový okamžitý příkon pomocných systémů `prikon [W]`, který se následně využije při bilanci výkonů v celém vozidle

Postup výpočtu je následující:

- **Výpočet požadovaného příkonu HVAC podle teploty:** Nejprve se určí potřebný výkon topení nebo chlazení na základě zadané venkovní teploty. V modelu je tato závislost dána kvadratickou funkcí:

$$P_{HVAC}(T) = A * T^2 + B * T + C \quad (18)$$

, kde T je okolní teplota [°C]

`koefZavislostiTeplotaHVAC = [0,0,0,0,0,0]; % Koeficienty křivky závislosti příkonu HVAC na teplotě [trolej/baterie]`

Koeficienty A, B, C se předávají z ParametryVozidla a jde o koeficienty polynomů, které vyšly z aproximace naměřených hodnot (Kapitola 2.1.3), kdy první 3 koeficienty jsou pro příkony pod trolejí a zbylé tři pro příkony během jízdy na baterii. Rozhodnutí, které koeficienty budou použity je podmíněno hodnotou proměnné pod\_Troleji.

- Omezení výkonu HVAC na dostupné maximum: Vypočtený požadavek  $P_{HVAC}$  se následně porovná s maximálním výkonem systému topení/klimatizace instalovaným ve vozidle. Tato hodnota  $P_{HVAC_{MAX}}$  je pevně dána parametry vozidla, různá pro maximální příkon topení a maximální příkon klimatizace. Pokud  $P_{HVAC}$  překročí dostupný výkon, je omezen na toto maximum:

$$P_{HVAC} = \min(P_{HVAC}, P_{HVAC_{MAX}}) \quad (19)$$

Tím model reflektuje skutečnost, že topení nebo klimatizace nemohou dodat vyšší výkon než jejich konstrukční limit (např. když je venku extrémní zima, topení jede na plno a nemůže dál zvyšovat příkon).

- **Výpočet příkonu ostatních 400 V AC spotřebičů:** Současně se k výslednému příkonu přičítá spotřeba dalších pomocných zařízení napájených ze střídavé sítě 400 VAC/50 Hz. Tato část je počítána stejným způsobem jako  $P_{HVAC}$  pomocí kvadratické rovnice:

$$P_{PP400VAC}(T) = A * T^2 + B * T + C \quad (20)$$

, kde T je okolí teplota [°C]

koefZavislostiTeplotaPP400VAC = [0,0,0,0,0,0]; % Koeficienty křivky závislosti příkonu PP400AC na teplotě [trolej/baterie]

Koeficienty A, B, C jsou opět předávány z ParametryVozidla a jde také o koeficienty polynomů z aproximace naměřených hodnot příkonů pomocných pohonů.  $P_{PP400VAC}$  reprezentuje průměrný výkon, který odebírají zařízení jako kompresor, posilovače a další. V reálném provozu se sice jejich odběr v čase mění (zapínají se cyklicky podle potřeby), ale pro účely simulace je použit průměrný příkon, který odpovídá dlouhodobému zatížení. Pokud by příkon pomocných pohonů mohl překročit maximální příkon, uplatnilo by se obdobně omezení maximumem  $P_{PP400VAC_{MAX}}$ .

- **Výpočet příkonu 24V palubní sítě:** Dále se připočítá odběr palubní sítě 24 V, která představuje odběr nízkonapěťové palubní sítě zahrnující osvětlení, ventilátory a řídicí systémy. Také je definován kvadratickou rovnicí a koeficienty z ParametryVozidla a limitován maximálním dovoleným výkonem 24V sítě.

$$P_{24V} = A * T^2 + B * T + C \quad (21)$$

, kde T je okolí teplota [°C]

koefZavislostiTeplota24V = [0,0,0,0,0,0]; % Koeficienty křivky závislosti příkonu Palubní sítě na teplotě [trolej/baterie]

- **Suma příkonů pomocných systémů:** Po vypočtení všech tří složek se tyto hodnoty sečtou. Získáme tak celkový příkon, který pomocné systémy aktuálně požadují z napájení vozidla:

$$P_{AUX} = \frac{P_{HVAC} + P_{PP400VAC} + P_{24V}}{\eta_{AUX}} \quad (22)$$

, kde  $P_{AUX}$  je celkový příkon všech pomocných pohonů, měřený na vstupu měniče A100 (na úrovni DC meziobvodu),  $\eta_{AUX}$  je účinnost měniče A100.

### 2.2.7. Baterie.m

Třída Baterie reprezentuje trakční akumulátor vozidla a v simulačním modelu slouží jako hlavní zdroj energie pro jízdu mimo trolejové vedení. Baterie pokrývá veškerou spotřebu vozidla, pokud není k dispozici trolej, a naopak při jízdě pod trolejí se může dobíjet (podle nastavené logiky řízení). Model u této třídy zohledňuje aktuální stav nabití baterie (SoC, State of Charge), respektuje výkonová omezení baterie a účinnost při nabíjení/vybíjení. Baterie tedy nikdy nepřekročí mez úplného vybití nebo přebití (SoC je udržován v rozsahu 0–100 %) a neumožní tok vyššího výkonu, než jsou definované limity.

Objekt třídy Baterie uchovává klíčové parametry akumulátoru a průběžně je aktualizuje. Mezi ně patří využitelná kapacita baterie (v kWh) a aktuální stav nabití stav\_nabiti (v %, SoC), ze kterého se odvozuje aktuální množství energie uložené v baterii energie\_celkova (v kWh). Dále jsou uloženy limity maximálního nabíjecího výkonu max\_prikon\_nabijeni (v kW) a maximálního vybíjecího výkonu max\_prikon\_vybijeni (v kW), které omezují tok energie do baterie a z baterie. Pro energetickou bilanci model sleduje také souhrnné hodnoty

celkové nabité energie `energieNabita` (v kWh) a celkové vybité energie `energieVybijena` (v kWh). Tyto veličiny se v průběhu simulace sčítají a umožňují vyhodnotit, kolik energie baterie celkem přijala (nabíjením či rekuperací) a vydala. Kapacita a okamžitá energie v baterii určují dostupný prostor pro nabíjení či vybíjení (například pokud je baterie téměř plná, nemůže pojmout další energii). Výkonové limity baterie se uplatňují při každém výpočtovém kroku kdy baterie dodá nebo pohltí nanejvýš stanovený výkon. Součtové ukazatele `energieNabita` a `energieVybijena` se pak zvýší o přenesenou energii v každém kroku simulace. Uživatel zadává počáteční stav nabití baterie při inicializaci simulace (prostřednictvím dialogového okna – Obrázek 17). Tato hodnota SoC (typicky 100 % nebo jiná zvolená hodnota uživatelem) je nastavena na začátku výpočtu pro zjištění celkové energie v baterii. Pokud by zadaný počáteční SoC ležel mimo povolený rozsah (0–100 %), je automaticky upraven na hodnotu 100 % a varováním uživatele, že zadal hodnotu mimo rozsah.



Obrázek 17 - Zadávání počáteční hodnoty SoC uživatelem

Hlavní metoda třídy `Baterie` je `[obj, skutecny_vykon] = aktualizujStavNabiti(obj, vykon_pozadovany, cas, ucinnost_baterie)`. Jejím úkolem je na základě požadovaného výkonu a délky časového kroku simulovat změnu stavu baterie – vypočítá tok energie do nebo z baterie za daný interval a podle toho aktualizuje SoC. Vstupními argumenty metody jsou: požadovaný výkon `vykon_pozadovany` (v kW), kladný při vybíjení baterie a záporný při nabíjení (z troleje nebo rekuperace), doba kroku `cas` (v s) a účinnost baterie `ucinnost_baterie` (bezrozměrná, zvláště definovaná pro nabíjení a pro vybíjení a zvolená při volání metody). Tyto vstupy předává nadřazený model vozidla (třída `ModelVozidla`) při každém výpočetním kroku simulace. Výstupem metody je skutečný výkon baterie `skutecny_vykon` (v kW), který baterie ve skutečnosti dodala nebo přijala během daného kroku po zohlednění limitů a účinnosti. Tento skutečný výkon je kladný, pokud baterie energii dodává (vybíjení), a záporný při nabíjení (energie do baterie). Metoda zároveň upraví vnitřní stav objektu `Baterie`, přepočte množství energie v baterii a odpovídající stav nabití SoC pro další krok.



Obrázek 18 - Blokové schéma třídy Baterie

Postup výpočtu je následující:

- **Omezení požadovaného výkonu:** Nejprve se požadovaný výkon (`vykon_pozadovany`) omezí podle výkonových možností baterie. Pokud `vykon_pozadovany` převyšuje maximální vybíjecí výkon baterie, je nahrazen hodnotou `max_prikon_vybijeni`. Naopak pokud záporný `vykon_pozadovany` svou absolutní hodnotou překročí limit nabíjecího výkonu, použije se hodnota `-max_prikon_nabijeni`. Tím je zajištěno, že požadavek nepřekročí fyzikální limity baterie.
- **Kontrola platnosti požadavku:** Jestliže je požadovaný výkon nedefinovaný (hodnota NaN) nebo nulový, výpočet se pro daný krok zjednoduší a stav baterie zůstane nezměněn. V takovém případě metoda okamžitě vrací nulový skutečný výkon (žádný tok energie) a neprovádí další výpočty.
- **Výpočet energie z výkonu:** Ze známého výkonu a časového intervalu se vypočte množství energie `energie_pozadovana` (v kWh), které má během jednoho kroku do baterie přitéct nebo z ní odejít (kladná hodnota znamená úbytek energie z baterie, záporná nabití baterie). Za předpokladu, že je požadovaný výkon v kW a časový krok v sekundách, platí vztah:

$$E = P * \Delta t \quad (23)$$

- **Zohlednění účinnosti - nabíjení:** Je-li požadovaný výkon záporný (požadavek na nabíjení baterie, včetně rekuperace), uplatní se účinnost nabíjení. Baterie z dodaného

výkonu vždy získá méně energie, než kolik bylo odebráno ze zdroje, podle hodnoty účinnosti. Efektivní energie, která se uloží do baterie, lze vyjádřit vztahem:

$$E_{požadovaná} = P * \Delta t \cdot \eta_{nabijeni} \quad (24)$$

Dále se kontroluje, zda baterie není plně nabitá. Vypočtená energie  $E_{požadovaná}$  se porovná se zbývajícím kapacitou baterie. Pokud by dodaná energie přesáhla volnou kapacitu (do 100 % SoC), využije se jen část  $E_{možná}$  odpovídající dostupné kapacitě.

$$E_{možná} = \min(|E_{požadovaná}|, kapacita\ baterie - E_{celková}), \text{ pro nabíjení baterie} \quad (25)$$

$$E_{možná} = \min(E_{požadovaná}, E_{celková}), \text{ pro vybíjení baterie} \quad (26)$$

Energie v baterii energie\_celkova se pak zvýší právě o  $E_{možná}$  a stejná hodnota se přičte k součtové proměnné energieNabita (akumulace všech nabitých energií). Metoda vypočte také skutečný nabíjecí výkon baterie, který odpovídá této reálně přijaté energii. Protože baterie přijala (uložila)  $E_{možná}$  kWh při účinnosti  $\eta_{nabijeni}$ , muselo být ze zdroje odebráno o něco více energie – konkrétně  $E_{možná}/\eta_{nabijeni}$ . Tomu odpovídá výkon skutecny\_vykon (záporný), který lze vyjádřit jako:

$$P_{skutečný} = -\frac{E_{možná}}{\eta_{nabijeni}} / \left(\frac{\Delta t}{3600}\right) [kW] \quad (27)$$

- **Zohlednění účinnosti – vybíjení:** Je-li požadovaný výkon kladný (požadavek na vybíjení neboli dodávku výkonu z baterie), postup je analogický s tím rozdílem, že účinnost zrychluje vybíjení baterie. Při vybíjení musí baterie kvůli ztrátám dodat o něco více energie, než kolik se dostane k zátěži. Vypočtená energie potřebná pro zátěž se proto dělí účinností:

$$E_{požadovaná} = P * \Delta t / \eta_{vybijeni} \quad (28)$$

Dostupná energie v baterii se nejprve ověří – pokud by vypočtené  $E_{požadovaná}$  bylo větší, než kolik energie aktuálně v baterii zbývá (energie\_celkova), omezí se  $E_{možná}$  na tuto maximální dostupnou hodnotu (SoC by jinak kleslo pod 0 %). Poté se baterie skutečně vybije o energii  $E_{možná}$ , tzn. sníží se energie\_celkova (a úměrně i SoC). Zároveň se  $E_{možná}$  přičte k proměnné energieVybijena jakožto přírůstek celkové vydané energie. Následně se určí skutečný výkon

dodaný baterií. Ze zmenšení energie baterie  $E_{možná}$  (kWh) a známé účinnosti  $\eta_{vybíjení}$  vyplývá, že využitá energie pro pohon byla  $E_{možná} * \eta_{vybíjení}$  (kWh). Průměrný výkon předaný z baterie do systému pak činí:

$$P_{skutečný} = \frac{E_{možná} * \eta_{vybíjení}}{\left(\frac{\Delta t}{3600}\right)} \quad (29)$$

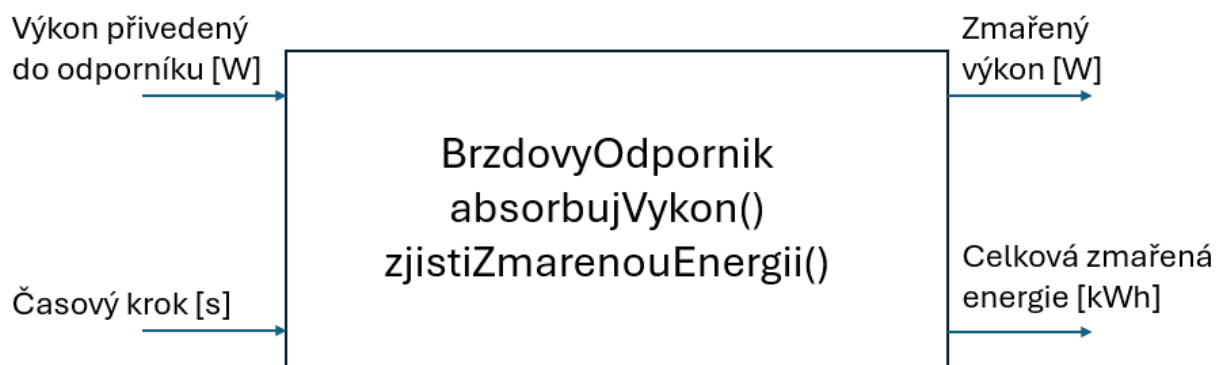
což je kladná hodnota (odpovídající požadovanému výkonu z baterie)

- **Aktualizace SoC:** Na konci výpočetního kroku se přepočítá stav nabití baterie `obj.stav_nabiti`. Nová hodnota SoC se získá z aktuální energie v akumulátoru `energie_celkova` a kapacity baterie:

$$SoC = \left(\frac{E_{celková}}{kapacita\ baterie}\right) * 100 \% \quad (30)$$

### 2.2.8. BrzdovyOdpornik.m

Třída `BrzdovyOdpornik` reprezentuje brzdový odpor vozidla v simulačním modelu parciálního trolejbusu. Tento prvek slouží k bezpečnému rozptýlení přebytečné energie při elektrodynamickém brzdění. Uplatní se zejména v situacích, kdy vozidlo není připojeno k trolejovému vedení nebo je jeho trakční baterie plně nabitá a nemůže přijmout rekuperovanou energii. Brzdový odpor pak veškerou takovouto přebytečnou energii přemění na teplo, čímž zabrání přepětí v obvodu a ztrátová energie se odvede do okolí.



Obrázek 19 - Blokové schéma třídy `BrzdovyOdpornik`

Obrázek 19 - Blokové schéma brzdového odporu. Schéma znázorňuje vstupní výkon [W] přivedený do brzdového odporu, jenž je absorbován a rozptýlen ve formě tepla

(`zmarenyVykonW [W]`). Zároveň je zobrazeno průběžné sčítání takto rozptýlené energie [kWh] od počátku simulace. Třída `BrzdovyOdpornik` má dva atributy typu `double`, které evidují rozptýlenou energii v brzdovém odporu: `energie_zmarena` a `energie_celkem`. `energie_zmarena` udává energii [kWh] zmařenou (rozptýlenou) v aktuálním časovém kroku, zatímco `energie_celkem` představuje celkovou (historicky) zmařenou energii [kWh] od začátku simulace. Při vytvoření objektu (volání konstruktoru) jsou oba tyto akumulátory inicializovány na 0 kWh, takže na počátku simulace je ztrátová energie nastavena na 0 kWh. Model brzdového odporu neuvažuje žádné omezení výkonu. To znamená, že komponenta je schopna absorbovat libovolný výkon a akumulovat neomezené množství energie. Zároveň se nepředpokládá že by docházelo ke ztrátám při přenosu, takže veškerý výkon předaný do brzdového odporu je plně přeměněn na teplo v odporu, také se neuvažuje s žádnou účinností měniče brzdového odporníku. Díky tomuto zjednodušenému předpokladu platí, že absorbovaný výkon (rozptýlený brzděním) je v každém okamžiku roven výkonu vstupnímu. Hlavní funkcionalitu zajišťuje metoda `[obj, zmarenyVykonW] = absorbujiVykon(obj, vykon, cas_kroku)`. Jejím vstupem je okamžitý výkon `vykon [W]` přivedený do brzdového odporu a délka aktuálního časového kroku `cas_kroku [s]`. Metoda vypočítá množství energie rozptýlené v tomto časovém kroku – vypočtená energie  $E_{zmařená}$  [kWh] odpovídá součinu výkonu a času, přepočteného na kWh:

$$E_{zmařená} = \frac{vykon * cas_{kroku}}{3,6 * 10^6} \quad (31)$$

, kde konstanta  $3,6 * 10^6$  převádí jednotky z wattsekund (J) na kilowatthodiny. Takto získaná energie se uloží do atributu `energie_zmarena` a zároveň se přičte do celkového součtu `energie_celkem`. Metoda tedy vrací také hodnotu `zmarenyVykonW [W]`, která bude rovna vstupnímu výkonu.

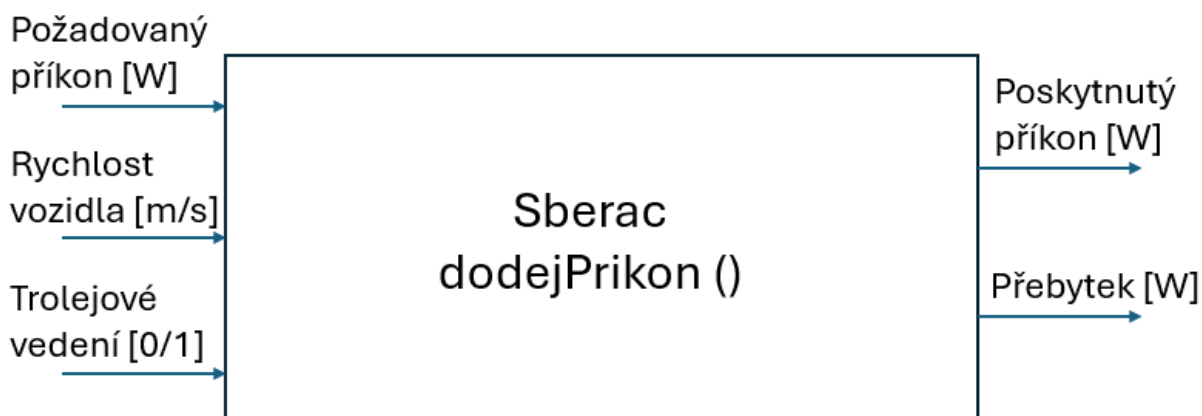
Kromě toho třída nabízí ještě doplňkovou metodu pro práci s energetickou bilancí brzdového odporu. Metoda `e = zjistizmařenouEnergii(obj)`, která vrací aktuální celkovou zmařenou energii [kWh] od počátku simulace (hodnotu uloženou v `energie_celkem`). Tím lze zjistit, kolik energie již brzdový odpor celkem rozptýlil jednoduchým voláním na konci simulaci pro energetickou bilanci.

### 2.2.9. Sberac.m

Následujícím blokem vytvořeného simulačního modelu elektrické spotřeby parciálního trolejbusu je třída Sberac, která reprezentuje rozhraní mezi trolejovým vedením a vozidlem. Tato třída slouží především k simulaci napájení vozidla z trakčního vedení, tedy sběračem, a k určení dostupného elektrického výkonu, který může vozidlo z trolejového vedení v různých režimech provozu odebírat.

Třída obsahuje tři konstantní parametry, které popisují technické omezení trolejového systému:

- `napeti_sberace [V]`: Nominální stejnosměrné napětí, které trolejové vedení poskytuje vozidlu. V reálném provozu se pohybuje v určitém rozpětí (např. 750–850 V), pro účely simulace je však zvolena pevná hodnota (850 V).
- `max_proud_stani [A]`: omezuje maximální elektrický proud, který vozidlo může odebírat ze sběrače, pokud je vozidlo ve stacionárním stavu (například při stání na zastávce), z důvody tepelné ochrany trolejového vedení.
- `max_proud_jizda [A]`: omezuje maximální proud odebíraný sběračem během jízdy vozidla.



Obrázek 20 - Blokové schéma třídy Sberac

Sběrač je v simulačním modelu realizován jako samostatný blok přijímající tři vstupní signály a poskytující dva hlavní výstupy (Obrázek 20). Vstupem `pod_troleji` (logická hodnota) systém zjistí, zda se vozidlo nachází pod trolejovým vedením a může odebírat energii z troleje. Dále modul přebírá požadavek příkonu z modelu (součet okamžitého trakčního, AUX, a trakční baterii nabíjecího příkonu ve W) a aktuální rychlost vozidla (m/s). Výstupní veličinou je výkon dodaný ze sběrače do vozidla a přebytkový/nedostatkový výkon. Přebytkový výkon

značí nevyužitou kapacitu troleje, kterou lze případně použít k dobíjení baterie, zatímco nedostatečný výkon indikuje chybějící část energie, již musí pokrýt trakční baterie.

Hlavní funkčnost pak zajišťuje metoda `[prikon_poskytnuty, prebytek] = dodejPrikon(obj, prikon_pozadovany, rychlost, pod_troleji)`, která na základě dané situace vypočítá, kolik výkonu může trolej v daném kroku dodat.

Vstupy této funkce jsou:

- `prikon_pozadovany [W]`: celkový požadovaný příkon (součet výkonu pro trakci, pomocné systémy a nabíjení trakční baterie) v daném okamžiku
- `rychlost [m/s]`: aktuální rychlost vozidla, pomocí které dojde k rozhodnutí, jestli použít `max_proud_stani` nebo `max_proud_jizda`
- `pod_troleji [0/1]`: zjištění, zda se vozidlo nachází pod trolejovým vedením a může odebírat energii z troleje

Výstupem funkce jsou dvě veličiny:

- `prikon_poskytnuty [W]`: udává skutečný výkon, který je v daném časovém kroku odebrán z trolejového vedení do vozidla
- `prebytek [W]`: kladný přebytek značí nevyužitou kapacitu troleje, kterou lze případně použít k dobíjení baterie, zatímco záporný přebytek indikuje chybějící část energie, kterou musí pokrýt trakční baterie.

Metoda `dodejPrikon` funguje následovně. Nejprve ověří, zda je vozidlo pod trolejí. Pokud není (`pod_troleji = 0`), pak sběrač neposkytuje žádný výkon v takovém případě vrací `prikon_poskytnuty = 0` a `prebytek = 0` (veškerý požadavek musí pokrýt baterie). Pokud je trolej k dispozici (`pod_troleji = 1`), vypočte se maximální dostupný výkon troleje `max_prikon` jako součin napětí a proudu (hodnota proudu je určována podle toho zda vozidlo stojí nebo jede). Sběrač pokryje celý požadavek vozidla. Dodaný výkon z troleje tedy odpovídá požadavku (`prikon_poskytnuty = prikon_pozadovany`) a zbývající nevyužitá kapacita troleje představuje přebytek: `prebytek = max_prikon - prikon_pozadovany` (kladná nebo nulová hodnota) a může být použita k dobíjení baterie.

Tím je zajištěno, že veškerá poptávka po energii je pokryta buď z troleje, nebo z baterie, a současně nedojde k překročení fyzikálních limitů (např. nadměrného proudu z troleje). Třída

Sběrač tak umožňuje plynulé střídání zdrojů energie v závislosti na dostupnosti trolejového vedení a pomáhá simulovat reálný provoz parciálního trolejbusu, včetně možností průběžného dobíjení baterií pod trolejí i nutnosti spoléhat se čistě na baterii v úsecích bez trolejí.

### **2.2.10. ModelVozidla.m**

Třída ModelVozidla představuje centrální výpočetní modul celého simulačního modelu. Její úlohou je provádět výpočet energetické bilance vozidla v každém časovém kroku simulace. Model využívá tzv. backward-facing princip, tedy postup „odzadu“ od požadovaného pohybu vozidla směrem ke zdroji energie.

Vstupy do výpočtu pro režim „Profil“ jsou:

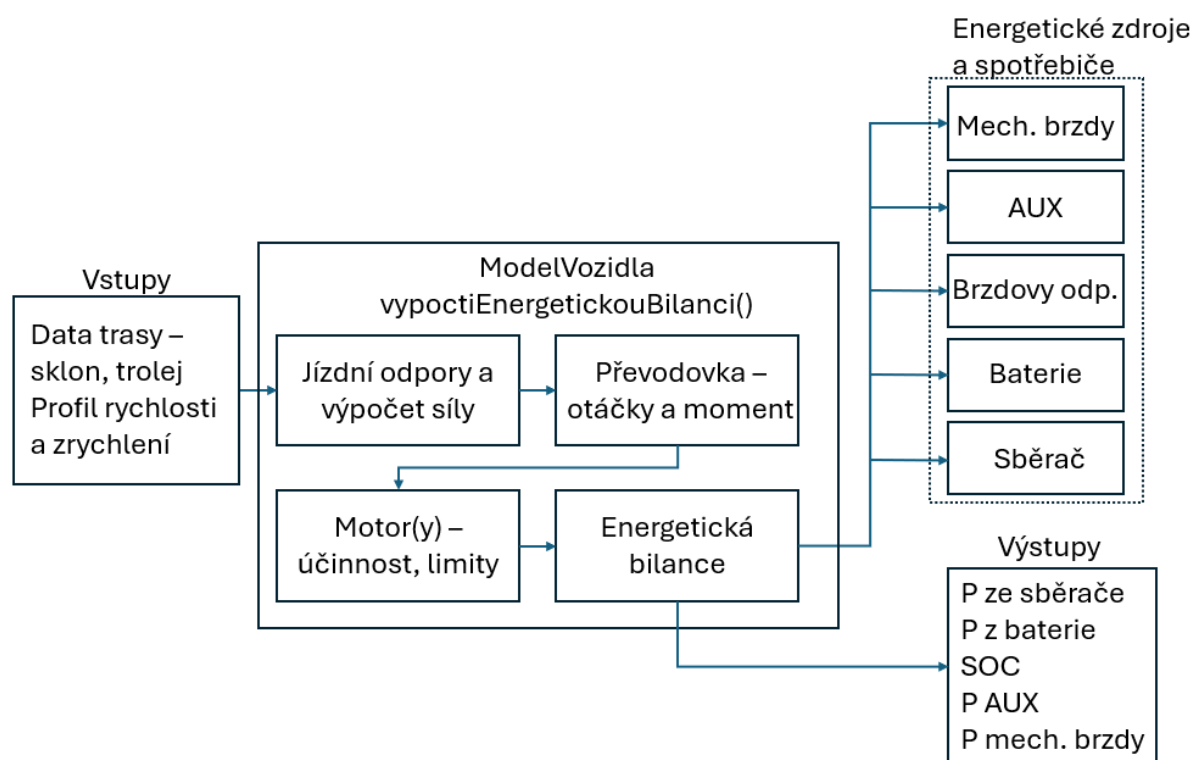
- Reálný profil rychlosti
- Zrychlení vozidla vypočítané v každém simulačním kroku z rychlostního profilu
- Aktuální pozice vozidla (ujetá dráha od počátku trasy)
- Časový krok simulace

Vstupy do výpočtu pro režim „Dynamický“ jsou:

- Profil rychlosti jako rychlostní limit v čase
- Konstantní žádané maximální zrychlení (akcelerace/decelerace) nastavitelné ve funkci ParametryVozidla
- Aktuální pozice vozidla (ujetá dráha od počátku trasy)
- Časový krok simulace

Také informace o trase (sklon, dostupnost troleje apod.), a z těchto veličin model v každém časovém kroku odvodí potřebnou hnací sílu na kolech. Následně se dopočítají odpovídající momenty a výkony v jednotlivých částech pohonu až po zdroj energie. Tím může být buď trolejové vedení, nebo trakční baterie. ModelVozidla tak simuluje tok energie od zdroje přes trakční motory, převodovku až ke kolům, případně tok rekuperované energie opačným směrem při brzdění. Výstupem jsou v každém okamžiku okamžité hodnoty výkonů, požadovaný elektrický výkon z troleje nebo z baterie (kladný při vybíjení, záporný při nabíjení), výkon pomocných pohonů, výkon rozptýlený v brzdovém odporu či mechanických brzdách atd. Tyto údaje umožňují sestavit detailní energetickou bilanci vozidla a sledovat průběh stavu nabití baterie v čase.

ModelVozidla je v rámci programu jednou z řady vzájemně propojených tříd, z nichž každá představuje jeden fyzický subsystém vozidla. Hlavní komponenty pohonného systému parciálního trolejbusu jsou znázorněny na blokovém schématu na Obrázek 21. ModelVozidla integruje tyto dílčí moduly a zajišťuje jejich spolupráci. Využívá instanci třídy JizdniOdporů k výpočtu vozidlových jízdních odporů, instanci třídy Prevodovka k přepočtu sil a momentů mezi kolem a hřídelí motoru, instanci třídy Motor (resp. pole více motorů) k určení účinnosti a omezení trakčního výkonu, instanci třídy Baterie pro sledování stavu akumulátoru a jeho interakce s energetickým tokem, instanci třídy Sberac pro simulaci připojení k trolejovému vedení a jeho výkonových omezení a instanci třídy BrzdovyOdpornik pro zachycení případné přebytečné energie při brzdění. Dále obsahuje instanci třídy A100\_AUX zastupující palubní pomocné pohony (kompresory, klimatizaci, topení, 24V síť atd.) a jejich aktuální spotřebu. Třída ModelVozidla tedy propojuje všechny tyto komponenty a v každém kroku simulace řeší výkonovou bilanci mezi požadavkem na pohon/brzdění a dostupnými zdroji energie.



Obrázek 21 - Blokové schéma třídy ModelVozidla

Při vytvoření instance (volání konstruktoru `ModelVozidla(typVozidla, trasa_soubor)`) dojde k inicializaci všech klíčových modulů a nastavení počátečního stavu. Konstruktor nejprve načte parametry zvoleného vozidla daného typu. Uživatel může předat řetězec s označením varianty vozidla (např. "24M" pro Škoda-Solaris 24m), pokud tak neučiní, nabídne se výběr z dostupných variant (Obrázek 22).

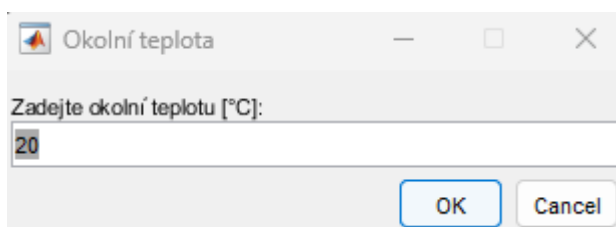


Obrázek 22 - Výběr typu vozidla

Na základě zvoleného typu se vytvoří objekt vozidlo (třída `Vozidlo`), který nese technické parametry jako např. hmotnosti, kapacitu a limity baterie, účinnosti, počet trakčních motorů, převodový poměr, poloměr kol, maximální akceleraci a deceleraci, podíl mechanické brzdy atd. Po vytvoření objektu vozidla se vypočte jeho celková hmotnost  $m_{Celk}$ . Dále se podle parametru `pocetMotoru` z tohoto objektu připraví pole instancí třídy `Motor`. Například přímo pro Škoda-Solaris 24m jako vůz se dvěma trakčními elektromotory se vytvoří dvě identické instance motoru (s předem definovanou mapou účinnosti a momentovým limitem). Následně se vytváří instance ostatních modulů: `BrzdovýOdporník`, `Prevodovka` (inicializovaná převodovým poměrem a poloměrem kola vozidla) a `Sběrač`. Z objektu vozidla se také načtou

žádané hodnoty zrychlení `maxAkcelerace` a `maxDecelerace`, které jsou využity při generování jízdního profilu v dynamickém režimu.

Po inicializaci pohonných komponent načte `ModelVozidla` data o trase. Pokud není zadán soubor s profilem trasy, otevře se dialog pro výběr, data trasy jsou v projektu uložena v Excel nebo binárním `.mat` souboru a zahrnují sekvenční popis úseků (délka, sklon, max. rychlost, přítomnost trolejového vedení atd.). Načtená instance třídy `Trasy` pak umožňuje dotazovat se na parametry trasy v libovolné ujeté vzdálenosti (metodou `zjistiInformace`). Před spuštěním simulace je ještě vyžádán údaj o okolní teplotě, kdy uživatel zadá aktuální venkovní teplotu, která ovlivňuje spotřebu pomocných AUX systémů (Obrázek 23). Tato teplota (ve °C) se uloží do proměnné `okolni_teploata`.



Obrázek 23 - Zadání okolní teploty

Nakonec se nastaví výchozí stav vozidla jako počáteční rychlost `rychlost = 0 m/s`, zrychlení `zrychlení = 0 m/s2` a převezme se počáteční stav nabití baterie `stav_nabiti` z objektu baterie (typicky 100 % nebo zadaná hodnota uživatelem (Obrázek 24)). Vytvoří se instance třídy `Baterie`, inicializovaná parametry vozidla, jako je kapacita akumulátoru v kWh, účinnost nabíjení/vybíjení a limity výkonu. Objekt baterie zajišťuje výpočty změn stavu nabití (SOC) na základě proudu výkonu do/ z baterie a hlídá, aby SOC nepřekročil rozmezí 0–100 % a aby nebyly překročeny maximální výkonové toky do/ z baterie. Poslední inicializovanou částí je modul `A100_AUX` pro pomocné pohony, ten je vytvořen s aktuální venkovní teplotou a informací, zda je vozidlo pod trolejí (na počátku simulace). Podle toho nastaví počáteční režim vytížení pomocných systémů. Tím je sestaven kompletní objekt `ModelVozidla` a simulace může začít.



Obrázek 24 - Zadání počátečního SoC

Stěžejní metodou třídy ModelVozidla je funkce:

```
[prikon_ze_sberace, vykon_z_baterie, spotrebaMotorVypocet, prikon_aux,
ucinnostMotoru, prikonMechW,
F_kola] = vypoctiEnergetickouBilanci(obj, dt, rezim, v_pozadovana, zrychle
niPozadovane, vzdalenost_km, rychlost).
```

Tato funkce představuje výpočetní jádro spouštějící se v každém diskretním časovém kroku simulace. Jejím úkolem je na základě aktuálního stavu vozidla a požadavků vypočítat:

1. Potřebný moment na trakčních motorech (resp. sílu na kolech) pro dosažení požadovaného pohybu.
2. Elektrický příkon požadovaný z troleje a/nebo baterie .
3. Příkon spotřebovaný pomocnými pohony.
4. Tok rekuperované energie při brzdění a jeho využití.
5. Průběžně aktualizovat stav nabití baterie.

Nyní podrobně k jednotlivým výpočtům uvnitř této metody:

**1. Výpočet požadované síly a momentu:** Podle zvoleného režimu jízdy se nejprve stanoví potřebná hnací nebo brzdící síla na obvodu kol. Vstupem je aktuální rychlost vozidla a požadované zrychlení (které může být kladné při akceleraci, nulové při konstantní rychlosti nebo záporné při zpomalování). Dále se z trasy zjistí sklon vozovky v aktuální pozici (v %, kladný do kopce, záporný z kopce). Celková odporová síla se skládá ze tří složek: valivý odpor a aerodynamický odpor, které závisejí na rychlosti, odpor ze sklonu a setrvačnost vozidla při změně rychlosti. Valivý a aerodynamický odpor vypočítá metoda `vypocitejJizdniOdpor` třídy `JizdniOdpor` (Kapitola 2.2.3). Odpor ze svahu  $F_{svahu}$  [N] se počítá jako:

$$F_{svahu} = m * g * \left( \frac{sklon}{100} \right) \quad (32)$$

, kde  $m$  je aktuální hmotnost vozidla [kg],  $g$  je gravitační zrychlení [m/s<sup>2</sup>]

Setrvačná síla  $F_{setr}$  [N] pak:

$$F_{setr} = m * k * a_{požadované} \quad (33)$$

, kde  $m$  je aktuální hmotnost vozidla [kg],  $k$  je součinitel rotujících hmot (konstanta 1,1),  $a_{požadované}$  je požadované zrychlení [ $m/s^2$ ]

Potřebná výsledná hnací síla  $F_{nutna}$  na kolech je součtem všech těchto složek:

$$F_{nutná} = F_{jizdniOdpor} + F_{svahu} + F_{setr} \quad (34)$$

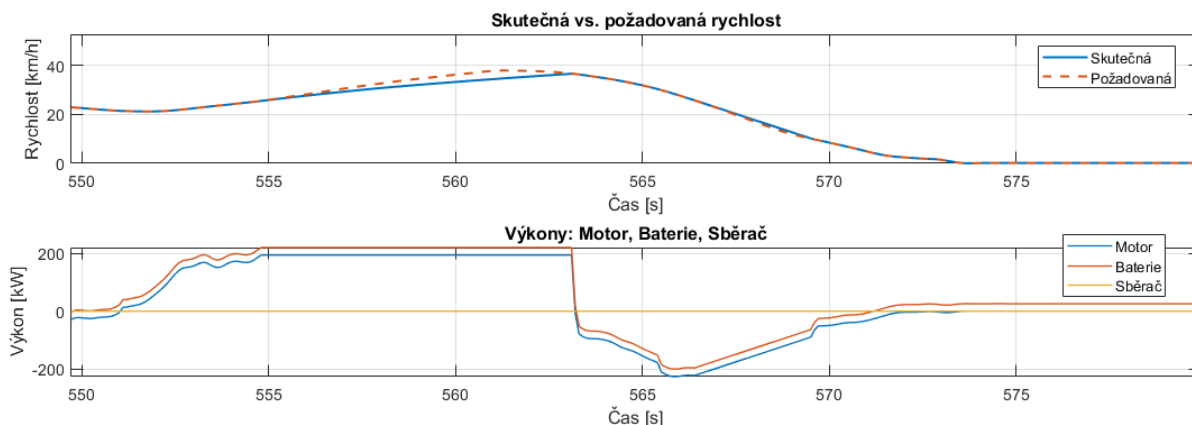
Pokud vyjde  $F_{nutna}$  kladná, vozidlo pohání kola dopřednou silou (akcelerace nebo udržení rychlosti), pokud vyjde záporná, vozidlo brzdí (při jízdě z kopce nebo při aktivním brzdění).

V režimu rychlostního profilu (režim = 'profil') se počítá zrychlení přímo z rychlosti dané rychlostním profilem.

$$a_{požadované} = \frac{v_{požadovaná} - v_{aktuální}}{\Delta t} \quad (35)$$

, kde  $a_{požadované}$  je vypočtené požadované zrychlení [ $m/s^2$ ],  $v_{požadovaná}$  je požadovaná rychlost [ $m/s$ ],  $v_{aktuální}$  je aktuální rychlost vozidla [ $m/s$ ] a  $\Delta t$  je časový krok [s].

Model v tomto případě předpokládá, že vozidlo sleduje zadaný rychlostní průběh, pokud by požadované síly překročily možnosti vozidla (např. baterie nemá dostatek energie nebo motor omezuje výkon), model to zaznamená a upraví výpočet (omezí moment), avšak nadále počítá s daným profilem rychlosti. To lze vidět na Obrázek 25, kdy došlo v tahu k omezení výkonu motorů a vozidlo dočasně nedokázalo následovat požadovaný rychlostní profil reálné jízdy.



Obrázek 25 - Sledování rychlostního profilu modelem

Naproti tomu v režimu dynamickém (režim = 'dynamicky') není rychlostní průběh předem dán, ale počítá se dynamicky na základě podmínek na trase a výkonových možností vozidla. Požadované zrychlení v tomto režimu je pevně určeno konstantami a nabývá převážně těch hodnot:  $0 \text{ m/s}^2$ ,  $\text{maxAkcelarace} = 1,5 \text{ m/s}^2$  a  $\text{maxDecelarace} = -1,4 \text{ m/s}^2$  uloženými v ParametryVozidla.m. V okrajových podmínkách (konec brzdění a konec akcelarace) však model požaduje jemnější hodnoty zrychlení, aby dosáhl požadované rychlosti přesněji. Model do jisté míry simuluje chování řidiče: pokud vůz jede z kopce a řidič nebrzdí (pouze udržuje rychlost, zrychlení = 0), pak se záporná složka  $F_{\text{svahu}}$  projeví jako samovolné zrychlování a model se snaží tomu zabránit využitím rekuperační brzdy. V dynamickém režimu se tedy při jízdě z kopce bez sešlápnutí brzdy automaticky aplikuje brzdný moment tak, aby vozidlo nepřekročilo rychlost (do kapacity rekuperace). Pokud „řidič“ sešlápně brzdu (žádané zrychlení je záporné), model počítá  $F_{\text{nutna}}$  přímo dle výše uvedeného vzorce (34) a výsledná síla bude záporná úměrně intenzitě zpomalování. O rozdělení brzdné síly mezi rekuperaci a mechanickou brzdu se pak starají následující kroky modelu.

Poté, co je spočtena  $F_{\text{nutna}}$ , převede se tato síla na celkový moment na kolech [Nm]:

$$M_{\text{kolo}} = F_{\text{nutná}} * r_{\text{kola}} \quad (36)$$

, kde  $r_{\text{kola}}$  je poloměr hnacích kol (v metrech). Tento moment (kladný či záporný) dále přepočítá převodovka na požadovaný moment na hřídeli trakčních motorů. Převodovka je v modelu zjednodušena na stálý převodový poměr  $i$ . Moment na motoru je tedy:

$$M_{\text{motor}} = \frac{M_{\text{kolo}}}{i * N} \quad (37)$$

, kde  $N$  je počet motorů (v případě Škoda-Solaris 24m se dvěma motory každý nese zhruba polovinu požadovaného momentu). Metoda `vypocetMomentMotoru` v modulu `Prevodovka` (Kapitola 2.2.4) provede právě toto rozdělení momentu na jednotlivé motory. Současně se určí pomocí funkce `vypocetiOtacky` otáčky hřídele motoru na základě obvodové rychlosti kol. Platí vztah:

$$\omega_{\text{motor}} = \frac{v}{r_{\text{kola}}} * i \quad (38)$$

, kde  $\omega_{\text{motor}}$  jsou otáčky motoru [ot./min],  $v$  je rychlost vozidla [m/s],  $r_{\text{kola}}$  je poloměr kola [m] a  $i$  je převodový poměr převodovky [-]

**2. Omezení momentu motorem:** Vypočtený požadovaný moment  $M_{\text{motor}}$  je následně omezen maximálními schopnostmi motoru. Každý trakční motor má omezený rozsah momentu

v závislosti na otáčkách, to je dáno jeho momentovou charakteristikou. Tato charakteristika je v modelu zadána tabulkově (Kapitola 2.2.5). ModelVozidla z ní získá mezní hodnotu momentu  $M_{max}$  pro aktuální otáčky a obdobně stanoví i maximální generátorický moment (rekuperační)  $M_{min}$ . Pokud požadovaný moment  $M_{motor}$  přesahuje tyto meze, je oříznut na interval  $\langle M_{min}, M_{max} \rangle$ . Tím je zajištěno, že model nežádá od motoru nerealizovatelný moment.

**3. Výpočet elektrického příkonu motorů:** Na základě (případně omezeného) momentu a otáček motoru se určí, kolik elektrického výkonu budou trakční měniče potřebovat z DC meziobvodu, případně kolik vyrobí při rekuperaci. Zde se uplatní účinnosti trakčního pohonu. V modelu je používán zjednodušený přístup kombinující tabulkovou účinnost motoru a konstantní účinnost měniče. Pro každý motor se spočte jeho mechanický výkon na hřídeli:

$$P_{mech} = M_{motor} * \omega_{motor} \quad (39)$$

a podle znaménka se rozliší, zda jde o odběr (trakci) neborekuperaci (brzdění). Pro trakční režim se elektrický výkon požadovaný z DC meziobvodu vypočte z mechanického dělením celkovou účinností trakčního měniče (účinnost motorů je již započítána ve třídě Motor – Kapitola 2.2.5):

$$P_{DC_{motor}} = \frac{P_{mech}}{\eta_{trakce}} \quad (40)$$

,takže z baterie/troleje je třeba o něco více výkonu než jde mechanicky na kola. Naopak při rekuperaci se výkon přiváděný do meziobvodu stanoví součinem mechanického výkonu a účinnosti rekuperačního režimu trakčního měniče:

$$P_{DC_{motor}} = P_{mech} * \eta_{rekuprace} \quad (41)$$

což odráží ztráty, kdy do elektrické soustavy se dostane jen část mechanického brzděného výkonu. Uvedené výpočty se provedou pro každý motor a sečtou, čímž získáme celkový příkon trakčních měničů z DC meziobvodu  $prikonTrakcniMenic\_DC$  [kW] (kladný při jízdě, záporný při brzdění).

**4. Výpočet příkonu pomocných pohonů:** Součástí energetické bilance je příkon pomocných systémů vozidla (klimatizace, topení, posilovače, kompresory, palubní síť atd.), který není zanedbatelný. Zejména HVAC může odebírat jednotky až desítky kW. ModelVozidla využívá k tomu třídu A100\_AUX (Kapitola 2.2.6). V každém kroku se zjistí, zda je vozidlo aktuálně pod trolejí (z dat trasy, podle ujeté vzdálenosti) a tato informace spolu s okolní teplotou se předá objektu aux. Metoda `vypoctiCelkovyPrikon` pak vrátí okamžitý požadovaný výkon AUX

systemů. Důležité je, že model rozlišuje, zda vůz jede na baterii nebo pod trolejí a pro oba stavy používá odlišné charakteristiky. To odráží provozní strategii, kdy při jízdě na baterii je HVAC omezeno (úsporný režim) oproti jízdě pod trolejí, kdy je k dispozici externí zdroj. Celkový příkon AUX (v kW) se označí `prikon_aux`. Ten je vždy kladný (odběr energie).

**5. Rozhodnutí o toku energie – režim jízdy vs. rekuperace:** Nyní má model k dispozici hodnoty celkového požadavku na příkon (`prikon_celkem` v kW) z DC sítě pro trakci a AUX:

$$P_{celkem} = P_{DC_{trakce}} + P_{AUX} \quad (42)$$

, který může být kladný (odběr energie pro pohon a AUX) nebo záporný (přebytky energie při rekuperaci převyšují spotřebu AUX). Dále zná informaci, zda je vůz připojen k trolejí (`pod_troleji`), a stav baterie. Podle znaménka  $P_{celkem}$  nastávají dvě hlavní větve výpočtu:

- **Běžný jízdní režim (trakce):** pokud je  $P_{celkem} \geq 0$ , vozidlo čerpá energii. Model nejprve spočítá celkový požadovaný výkon z DC meziobvodu [W]:

$$P_{DC_{požadovaný}} = P_{celkem} * 1000 \quad (43)$$

, kde převod násobkem 1000 mění jednotku z kilowattů na watty.

Následně se určí, kolik z tohoto výkonu dodá trolej a kolik baterie:

- Pokud je vozidlo pod trolejí, zavolá se metoda `obj.sberac.dodejPrikon`. Tato metoda vrátí skutečně dodaný výkon ze sítě `prikon_ze_sberace` [W] a případný přebytek kapacity troleje `prebytek_sberace` [W].
- Pokud je vozidlo mimo trolej (jede na baterii), pak pochopitelně `prikon_ze_sberace = 0` a celý  $P_{DC_{požadovaný}}$  musí dodat baterie.
- Pokud vozidlo jede pod trolejí, může nastat situace, že trolej může dodat více, než je aktuálně potřeba. Třída `Sberac` proto vrací i hodnotu `prebytek_sberace`, což je výkon, který „*může*“ být ještě odebrán z troleje navíc k aktuálnímu požadavku. Pokud `prebytek_sberace > 0` a současně  $P_{celkem} > 0$  (trolej má rezervu výkonu pro dobíjení trakční baterie), využije model tento přebytek k nabíjení baterie za jízdy. Samozřejmě jen v případě, že baterie není plně nabitá. Je zde uplatněn limit nabíjení, vozidlo má v parametrech nastaven maximální příkon nabíjení z troleje, a baterie má také omezen svůj nabíjecí výkon. Model vezme menší z hodnot (přebytek sítě, nabíjecí limit baterie)

jako skutečný nabíjecí výkon. O tento výkon upraví (zvýší) odběr ze sítě `prikon_ze_sberace` a zároveň zapíše záporný výkon baterie `vykon_z_baterie` (baterie se nabíjí). Tím do výpočtu zahrne, že například při jízdě pod trolejí může část výkonu z troleje plynout do nabití akumulátoru (to prodlouží dojezd v bateriovém úseku). Pokud by byla baterie plná (SOC = 100 %), pak se žádný přebytek neodebere a `vykon_z_baterie = 0` a přebytek z troleje zůstane nevyužit. Důležité je, že model neumožňuje tok energie z vozidla do troleje ani v této větvi – trolejový zdroj pokrývá spotřebu, ale pokud je energie nadbytek (např. baterie plná a vůz zrovna brzdí pod trolejí), nevrací se do troleje.

- Pokud naopak trolej nepokrývá celý požadavek (nebo není k dispozici vůbec), musí deficit dodat baterie. Vypočte se:

$$P_{zBaterie} = P_{DC\text{požadované}} - P_{sběrače} \quad (44)$$

, což bude kladné číslo, protože baterie dodává energii). Tím se určí, kolik wattů musí baterie aktuálně poskytnout.

- **Rekupační režim (brzdění):** pokud  $P_{celkem} < 0$ , znamená to, že v daném okamžiku jsou na meziobvodu přebytky energie. Jinými slovy, trakční motory působí jako generátory (vozidlo brzdí nebo jede z kopce) a vyrábějí více energie, než spotřebují pomocné pohony. Model rozdělí tuto energii do baterie nebo brzdového odporníku. Nejprve se vezme absolutní hodnota výkonu:

$$P_{rekuperace} = -P_{celkem} * 1000 \quad (45)$$

, kde  $P_{rekuperace}$  je kladný a převede se na wattů.

Model postupuje tak, že prioritně při rekuperaci pokryje spotřebu AUX pohonů a poté ukládá energii do baterie (pokud není téměř plná). Zavolá metodu baterie `aktualizujStavNabiti` a záporným výkonem požaduje nabití baterie, zohlední účinnost nabíjení baterie a získá skutečný výkon přijatý baterií. Ten může být nižší než požadovaný, pokud je baterie omezená (např. dosahuje max. nabíjecího příkonu nebo SOC blízko 100 %). Model vypočte rozdíl jako přebytek rekuperace, který se do baterie nevešel. Pokud je tento přebytek  $> 0$ , předá jej brzdovému odporníku voláním `obj.brzdovy_odpornik.absorbujVykon`, čímž simulujeme, že odpor přemění část energie na teplo. V modelu je také zavedeno při každém brzdění určité procento na podíl mechanické

brzdy (parametr uložený v ParametryVozidla) a je zohledněn už při výpočtu síly na kolech  $F_{nutná}$ . V případě záporné  $F_{nutná}$  (brzdění):

$$F_{mech} = podíl_{mech} * |F_{nutná}| \quad (46)$$

$$F_{rekuperaace} = |F_{nutná}| - F_{mech} \quad (47)$$

Výsledný mechanický výkon ztracený v brzdách  $P_{ikonMechW}$  [W] se pak stanoví jako:

$$P_{mech} = F_{mech} * v \quad (48)$$

, kde  $F_{mech}$  je brzdná síla (v N) a  $v$  je rychlost vozidla (v m/s)

Rekupační síla  $F_{rekuperaace}$  je následně použita k vygenerování brzděného momentu na trakčních motorech pomocí funkce `vypoctiMomentMotoru` ve třídě `Prevodovka`, která propočítá potřebný moment jednoho motoru  $M_{motor}$  [Nm] pro zajištění požadovaného momentu na kolech:

$$M_{motor} = \frac{F_{rekuperaace} * r}{N_{motorů} * i * \eta_{převodovky}} \quad (49)$$

, kde  $r$  je poloměr kola [m],  $N_{motorů}$  je počet trakčních motorů [-],  $i$  je převodový poměr [-] a  $\eta_{převodovky}$  je účinnost převodovky [-].

Tento moment  $M_{motor}$  vyjde záporný (protože působí proti smyslu otáčení kol) a odpovídá brzděnému momentu, který mají motory vygenerovat. Celkový mechanický výkon rekuperaace  $P_{mechrekuperaace}$  [W]

$$P_{mechrekuperaace} = F_{rekuperaace} * v \quad (50)$$

, kde  $v$  je rychlost vozidla [m/s]. Tento výkon je záporný a přepočítá se na elektrický výkon do DC meziobvodu s ohledem na účinnost trakčního řetězce při rekuperaci:

$$P_{DCTrakce} = \frac{\eta_{trakcerekuperaace} * P_{mechrekuperaace}}{1000} [kW] \quad (51)$$

Model tedy vždy část energie odepisuje mechanicky a jen zbytek se pokouší uložit. Každopádně do troleje se rekuperovaná energie nevrací, i když je vůz pod trolejí, veškerá regenerovaná energie se využije v rámci vozidla nebo rozptýlí v odporníku/brzdách.

**6. Aktualizace stavu baterie a omezení výkonu:** Po vyřešení toku energie se získá výsledný výkon na svorkách baterie  $vykon\_z\_baterie$  (kladný, pokud se baterie vybíjela v tomto kroku, záporný, pokud se nabíla). Na jeho základě se provede konečná aktualizace stavu nabití baterie. Metoda `aktualizujStavNabiti` uvnitř třídy `Baterie` přepočte změnu SOC: odečte nebo přičte přírůstek energie (při vybíjení zmenší SOC, při nabití zvětší):

$$\Delta E = P_{baterie} * \Delta t \quad (52)$$

Tato metoda `aktualizujStavNabiti` uvnitř třídy `Baterie` také hlídá limity baterie, pokud požadovaný výkon  $P_{baterie}$  překračuje maximální vybíjecí výkon baterie nebo by snížil SOC pod 0 %, vrátí místo něj omezenou hodnotu  $P_{baterie_{skutečný}}$ . Model to pozná tak, že skutečný dodaný výkon je menší než požadovaný. V takovém případě upraví zpětně i moment motorů a vypočítá, o jaký poměr byl výkon baterie omezen, a stejným poměrem sníží  $M_{motor}$ . Tím se zajistí, že v příštím kroku se dynamika vozidla přizpůsobí možnostem baterie (v režimu dynamickém to znamená nižší dosažené zrychlení, v režimu profilovém to znamená nesplnění požadavku na akceleraci). Obdobně pokud při nabíjení baterie (rekuperaci) baterie nepobrala všechnen výkon (skutečně se nabílo méně, než bylo k dispozici), model sníží brzdný moment motorů. Tato iterativní korekce výkonu a momentu probíhá uvnitř pomocné metody `omezMomentPodlePrikonu`, ta v několika krocích (max. 10 iterací) zkouší dosáhnout rovnováhy, kdy požadovaný výkon nepřesahuje limity baterie. Výsledkem je omezený moment `momentNaMotor` a tomu odpovídající upravené výkony.

**7. Kontrola bilance:** Pro účely ladění modelu se na závěr provádí kontrola výkonových toků na DC meziobvodu. Sečtou se všechny toky výkonu v [W]: kladné toky do meziobvodu (odběr z troleje, výkon generovaný motory při rekuperaci, pokud by byl) a záporné toky z meziobvodu (příkon motorů při pohonu, příkon AUX, výkon odcházející do baterie při nabíjení nebo do odporníku). Součet by ideálně měl být nulový. Model toleruje odchylku do 1 W, jinak vypíše varování s výpisem všech dílčích výkonů pro identifikaci nesrovnalostí. Tato kontrola potvrzuje zákon zachování energie v rámci simulace.

Celý popsaný výpočet se provede v každém časovém kroku v rámci smyčky řízené třídou `Simulace` (která volá `vypoctiEnergetickouBilanci` každý časový krok). Třída `ModelVozidla` si průběžně uchovává některé kumulativní veličiny, např. `energieRekuperovana` (součet kWh uložených do baterie rekuperací od začátku jízdy)

a rekuperovana\_aktualni (rekuperace v aktuálním kroku dodaná do DC meziobvodu, pro účely logování).

Jak bylo zmíněno, třída ModelVozidla podporuje dva způsoby řízení jízdy:

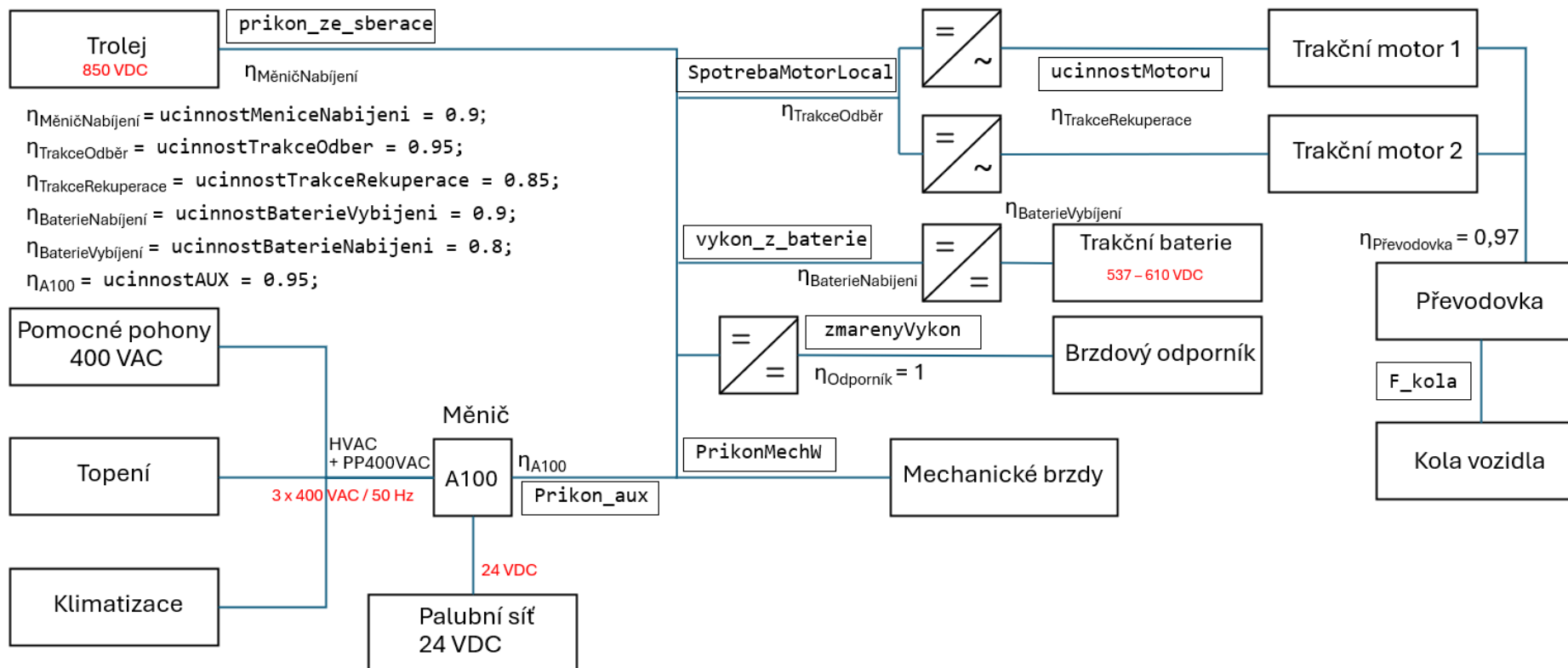
- **Režim „rychlostní profil“** (režim = 'profil'): V tomto režimu je vstupem simulace přímo časový průběh rychlosti (a z něj odvozené zrychlení), naměřený profil z reálné jízdy. Model se tedy snaží dodržet tuto zadanou rychlost v každém časovém okamžiku. Výpočet popsán výše předpokládá právě tento případ. Pokud by však požadavky přesáhly schopnosti vozidla, model to indikuje omezením momentu a rozdílem mezi požadovaným a skutečně využitým výkonem baterie. Požadovaná rychlost kopíruje rychlostní profil z reálné jízdy, i když model v důvodu omezení nemusí zvládnout tento profil kopírovat (Obrázek 25). Režim profil se využívá hlavně pro energetické vyhodnocení konkrétního jízdního scénáře – např. vyhodnotíme spotřebu energie pro daný naměřený průběh jízdy, zjistíme, kolik z toho šlo z troleje a z baterie, jak se měnil SOC apod.
- **Režim „dynamický“** (režim = 'dynamicky'): Zde uživatel nepředepisuje celý profil rychlosti, pouze rychlostní omezení v rámci definice trasy. Model pak sám generuje průběh okamžité rychlosti. Zrychluje tak, aby dosáhl povolené rychlosti, využívá maximální možnosti akcelerace a brzdí do zastávek apod. Vnitřně výpočet momentů v dynamickém režimu řeší například to, že při jízdě z kopce bez brzdění se aplikuje rekuperační moment k udržení rychlosti (do limitu baterie), nebo že když se blíží zastávka, model zahájí rekuperační brzdění ve vhodný okamžik, aby vozidlo zastavilo na požadovaném místě zastavení, nebo aby vozidlo vjíždělo do úseku s nižší maximální povolenou rychlostí s již sníženou rychlostí. Režim dynamický nevyužívá přímo zadané  $v_{požadovaná}(t)$ , ale místo toho v každém kroku určí, jaké cílové rychlosti chce dosáhnout (podle rychlostního limitu v dalším úseku) a jaké zrychlení k tomu použije. Tím stanoví vstup zrychlení pro výpočet síly. Dynamický režim počítá otáčky motoru z výhledové rychlosti  $v\_požadovana$  (nikoli z aktuální), což zajišťuje správné omezení momentu pro cílovou rychlost. Celkově je dynamický režim složitější, ale z pohledu funkce ModelVozidla rozdíl není velký, do vypoctiEnergetickouBilanci se jen dosadí jiné zrychlení a požadovaná rychlost. Logika omezení výkonů, rekuperace atd. funguje stejně.

Mezi hlavní výstupní proměnné třídy ModelVozidla patří (Obrázek 26):

- `prikon_ze_sberace` [W] – elektrický výkon odebíraný z trolejového vedení. Pokud je kladný, znamená to odběr energie z externí sítě do vozidla, nulový znamená, že trolej buď není k dispozici nebo aktuálně nedodává výkon. (V režimu rekuperace zůstává nulový, protože model neuvažuje vracení výkonu do troleje.)
- `vykon_z_baterie` [W] – elektrický výkon získaný na svorkách baterie. Kladná hodnota znamená, že baterie se vybíjí a dodává výkon pohonu/AUX, záporná hodnota značí, že baterie se naopak nabíjí (energie do ní přitéká, např. rekuperací nebo z troleje při přebytku). Nulová hodnota značí, že baterie se v daném okamžiku neúčastní toku energie (buď není potřeba, nebo je plná a nerekuje). Tato veličina společně s časovým krokem přímo souvisí se změnou SOC, integrálem výkonu z baterie přes čas lze určit úbytek či přírůstek energie akumulátoru.
- `spotrebaMotorVypocet` [kW] – souhrnný elektrický příkon trakčních motorů (resp. měničů) na DC meziobvodu. Je to výkon požadovaný všemi trakčními pohony dohromady. Při jízdě vpřed je kladný, při rekuperaci je záporný. Tato hodnota je už počítána včetně účinností motorů a měničů – tzn. vyjadřuje skutečný výkon na DC sběrnici, který musí být dodán ze zdroje (trolej/baterie) nebo který naopak přebývá při brzdění.
- `prikon_aux` [kW] – příkon pomocných pohonů na DC meziobvodu. Jedná se vždy o kladnou hodnotu, typicky v rozmezí jednotek až nižších desítek kW. Zahrnuje spotřebu vytápění, klimatizace, kompresorů, servosystémů a 24V palubní sítě. Tato hodnota je funkcí okolní teploty a napájecího režimu (trolej/baterie). Integrací v čase lze určit celkovou spotřebovanou energii na AUX za jízdu.
- `ucinnostMotoru` [-] – průměrná účinnost trakčních motorů v daném okamžiku. Jelikož model využívá kombinaci tabulkové účinnosti motoru a konstantní účinnosti měniče, tato hodnota dává představu o momentální efektivitě přeměny elektrické energie na mechanickou (či naopak). Pokud je např. 0,85, znamená to, že 85 % výkonu odebraného z meziobvodu se přeměnilo na mechanický výkon na hřídeli (15 % ztráty jako teplo v motoru/měniči). Při rekuperaci by analogicky představovala účinnost využití mechanické energie do elektřiny. Tato veličina se využívá spíše k analytickým účelům.

- $p_{\text{ikonMechW}}$  [W] – mechanický výkon ztracený v brzdách. Tímto se kvantifikuje, kolik výkonu nebylo možné rekuperovat a muselo se zmařit třením v mechanických brzdách. V běžné jízdě (bez brzdění) je pochopitelně nulový. Závisí na nastaveném podílu mechanické brzdy a na limitacích rekuperace. Je vyjádřen v kladných hodnotách.
- $F_{\text{kola}}$  [N] – okamžitá celková tahová nebo brzdná síla působící na hnací kola. Kladná hodnota znamená záběr (akceleraci nebo jízdu do kopce), záporná hodnota brzdění či jízdu z kopce.

Na Obrázek 26 jsou také zapsány účinnosti jednotlivých měničů a převodovky. Měnič nabíjení u sběrače je účinnost DC-DC měniče, který je aktivní pro případ nabíjení baterie ze sběrače. Účinnost  $\eta_{\text{TrakceRekuperace}}$  je účinnost měniče při rekuperaci z motorů do DC meziobvodu, opačně pak  $\eta_{\text{TrakceOdběr}}$  je účinnost měniče při tahu motorů a jejich napájení z troleje/baterie.  $\eta_{\text{BaterieVybijeni}}$  je účinnost při nabíjení baterie z DC meziobvodu a samozřejmě  $\eta_{\text{BaterieNabijeni}}$  je účinnost při nabíjení baterie z DC meziobvodu.



Obrázek 26 - Výstupní proměnné funkce vypočítané Energetickou Bilancí()

Kromě výše uvedených výstupů, které se typicky zaznamenávají pro každý krok, třída ModelVozidla udržuje i kumulativní hodnoty. Například energieRekuperovana [kWh] reprezentuje energii, kterou se dosud podařilo rekuperovat do baterie (součet za celou jízdu).

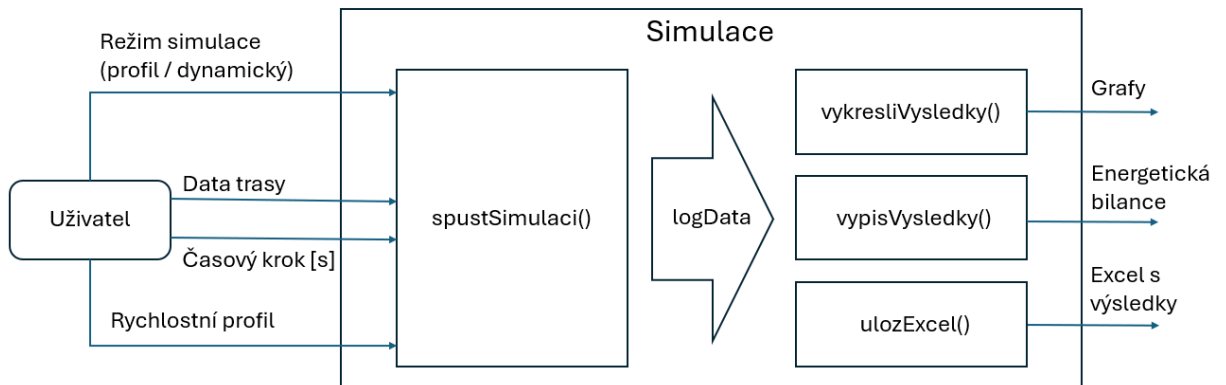
Z hlediska ovlivňujících proměnných je zřejmé, že stav nabití baterie (*SOC*) má přímý dopad na chování modelu, pokud *SOC* klesne k 0 %, baterie již nemůže dodávat výkon, naopak při *SOC* = 100 % není možná rekuperace do baterie, a veškerá brzdná energie musí jít do odporníku. Vstupními parametry, které lze měnit a které ovlivňují výsledky, jsou například kapacita baterie, maximální nabíjecí a vybíjecí výkony baterie (limitují špičkovou rekuperaci a akceleraci na baterii), účinnosti (trakční, rekuperační, baterie při nabíjení/vybíjení, účinnost měniče AUX apod.), podíl mechanické brzdy (ovlivní, kolik energie se systematicky ztrácí v brzdách) a výkonová zátěž AUX (která závisí na teplotě a režimu napájení – v zimě při jízdě na baterii mohou pomocné pohony odčerpávat značnou část dostupné energie). Dále parametry jako hmotnost vozidla (ovlivňuje setrvačnost i valivý odpor), aerodynamika a sklon trasy ovlivňují požadovaný trakční výkon, takže nepřímo též ovlivní, kolik energie se musí čerpat z baterie/troleje. Model umožňuje měnit i počet cestujících (tj. celkovou hmotnost) a tím studovat vliv zatížení vozidla na spotřebu energie.

Třída ModelVozidla tvoří centrální výpočetní jednotku simulátoru parciálního trolejbusu. Zajišťuje provázání všech dílčích modelů (motor, převodovka, baterie, sběrač, odporník, pomocné pohony) a na základě principu zpětného výpočtu stanovuje v každém časovém kroku tok energie od zdroje až ke kolům (nebo opačně při brzdění). Díky modulárnímu pojetí je možné snadno měnit parametry vozidla či trasy a sledovat dopad na výslednou energetickou bilanci. ModelVozidla respektuje fyzikální limity komponent – omezuje moment motory dle jejich charakteristik, omezuje tok výkonu baterií podle jejich mezí a zajišťuje, že nedojde k porušení bilance energie.

### **2.2.11. Simulace.m**

Třída Simulace představuje nadřazený modul, který zajišťuje spuštění a řízení celé simulace jízdy parciálního trolejbusu. Navazuje na výpočetní jádro modelu (třidu ModelVozidla) a stará se o řízení simulačního cyklu, od přípravy vstupních dat přes iterativní výpočty v každém časovém kroku až po uložení a vizualizaci výsledků. Simulace tedy slouží jako hlavní smyčka programu, která opakovaně volá ModelVozidla pro výpočet energetické bilance v diskretních krocích a postupně buduje kompletní obraz průběhu jízdy. Dále zajišťuje

interakci s uživatelem (např. výběr režimu simulace a načtení vstupních souborů) a po dokončení jízdy automaticky generuje výstupy potřebné pro analýzu jako záznam průběhu, souhrnné statistiky spotřeby energie, grafy a export do souborů.



Obrázek 27 - Blokové schéma třídy Simulace

Objekt třídy Simulace po zavolání funkce `spustSimulaci(obj)` při svém spuštění vytváří instanci modelu vozidla a následně pracuje s řadou vlastností, které popisují aktuální stav simulace a shromažďují výsledky. K nejdůležitějším atributům patří:

- `modelVozidla` – objekt třídy `ModelVozidla`, která obsahuje všechny modely dílčích subsystémů vozidla a poskytuje rozhraní pro výpočet bilance výkonů.
- `trasy` – objekt třídy `Trasy` nesoucí data o simulační trase (sekvence úseků s délkami, sklony, rychlostními limity, polohami a typy zastávek, nadmořskou výškou, přítomností trolejového vedení a příznakem zastavení na začátku úseku).
- `casovyKrok` – délka jednoho kroku simulace v sekundách [s]. Tato veličina určuje rozlišení diskrétní simulace v režimu simulace „dynamický“, v režimu „profil“ je tato hodnota dána načteným profilem rychlosti.
- `celkovyCas` – kumulativní čas simulace [s], který se postupně navyšuje od 0 s až do konce jízdy.
- `rezimJizdy` – zvolený režim simulace, buď 'profil' (simulace podle předem daného rychlostního profilu) nebo 'dynamicky' (simulace s výpočtem pohybu vozidla na základě rychlostního omezení v rámci definice trasy).

- `RychlostniProfil` – tabulka načteného rychlostního profilu v čase (používá se pouze v režimu „Profil“). Obsahuje např. časové značky a okamžité rychlosti vozidla (v km/h) v jednotlivých časových krocích dle záznamu nebo generovaného průběhu.
- `aktualniPozice` – aktuální ujetá vzdálenost vozidla na trase [m]. Na začátku simulace 0 m, při průběhu se zvyšuje až do délky celé trasy.
- `rychlost` – aktuální rychlost vozidla [m/s] v každém kroku simulace.
- `stavZastavene` – logická proměnná indikující, zda vozidlo právě stojí v zastávce (nebo jiném místě, kde musí zastavit). Je false, pokud je vozidlo v pohybu, a true po dobu stání. Používá se pouze v režimu „Dynamický“.
- `casZastaveniZacatek` – čas [s], kdy vozidlo začalo stát na poslední zastávce. Slouží k měření uplynulé doby stání a určení, kdy opět pokračovat v jízdě. Používá se pouze v režimu „Dynamický“.
- `zastavkyObslouzene` – pole indexů úseků/zastávek, které již byly obslouženy (vozidlo se na nich zastavilo a pokračovalo dál). Pomáhá zajistit, že jedno místo zastavení nebude v jedné jízdě zpracováno vícekrát. Používá se pouze v režimu „Dynamický“.
- `rezimBrzdeniDoZastavky` – příznak signalizující, že vozidlo je právě ve fázi brzdění do zastávky. Tato proměnná přejde na true ve chvíli, kdy se simulační logika rozhodne začít brzdění tak, aby vozidlo zastavilo v nadcházející zastávce (před jejím dosažením). Po opuštění zastávky se opět nastaví na false. Používá se pouze v režimu „Dynamický“.
- `rychlostPredZacatkemBrzdeni` – okamžitá rychlost [m/s] vozidla těsně před tím, než začne brzdění do zastávky. Slouží pro výpočet brzdné dráhy. Používá se pouze v režimu „Dynamický“.
- `logData` – datová struktura (tabulka), do níž se logují výsledky simulace v každém kroku (Obrázek 28). Každý řádek tabulky představuje jeden časový krok a zahrnuje desítky veličin popisujících stav vozidla a výkonovou bilanci (čas, ujetou vzdálenost, skutečnou a požadovanou rychlost, stav baterie, výkony motorů, AUX, trolejového sběrače, baterie, rekuperace, odporů atd.).

```

%%Logování aktuálního kroku do tabulky
radky = {
    obj.celkovyCas, ... % 1 Cas [s]
    obj.aktualniPozice, ... % 2 Vzdalenost [m]
    obj.rychlost * 3.6, ... % 3 Rychlost [km/h]
    obj.modelVozidla.stav_nabiti, ... % 4 SOC [%]
    double(spotrebaMotorLocal), ... % 5 PrikonMotor [kW]
    spotrebaAUX, ... % 6 PrikonAUX [kW]
    v_pozadovana * 3.6, ... % 7 RychlostPozad [km/h]
    idx, ... % 8 UsekIdx
    double(obj.stavZastavene), ... % 9 ZastaveneAktivne [0/1]
    rychlostLimit, ... % 10 RychlostLimit [m/s]
    rychlostLimitNext, ... % 11 RychlostLimitNext [m/s]
    zrychleniPozadovane, ... % 12 ZrychleniPozadovane [m/s²]
    obj.trasy.data{idx,6}, ... % 13 DelkaUseku [m]
    vykon_ze_sberace, ... % 14 VykonSberac [W]
    vykon_z_baterie, ... % 15 VykonBaterie [W]
    obj.trasy.data{idx,8}, ... % 16 PodTroleji [0/1]
    prikonOdporW, ... % 17 PrikonOdpor [W]
    energieOdpor_kWh, ... % 18 EnergieOdpor [kWh]
    prikonMechW, ... % 19 PrikonMechBrzd [W]
    (prikonMechW * obj.casovyKrok) / 3600000, ... % 20 EnergieMechBrzd [kWh]
    obj.modelVozidla.rekuperovana_aktualni % 21 RekuperaceAktualni [kWh]
};

% Přidání do tabulky
obj.logData = [obj.logData; radky];

```

Obrázek 28 - Tabulka logData pro ukládání hodnot z průběhu simulace

- Energetické akumulátory: během simulace třída průběžně počítá celkové energie proteklé mezi jednotlivými komponenty modelu vozidla. K tomu slouží atributy energieZeSberace, energieZBaterie, energieMotoru, energieAUX (vše [kWh]), které reprezentují energii odebranou ze sběrače, celkovou energii odebranou z baterie (resp. dodanou do baterie při nabíjení zápornou hodnotou), energii spotřebovanou trakčními motory a energii spotřebovanou pomocnými pohony.

$$E_{sběrače} = E_{sběrače} + \frac{P_{sběrač}}{1000} * \frac{\Delta t}{3600} \quad (52)$$

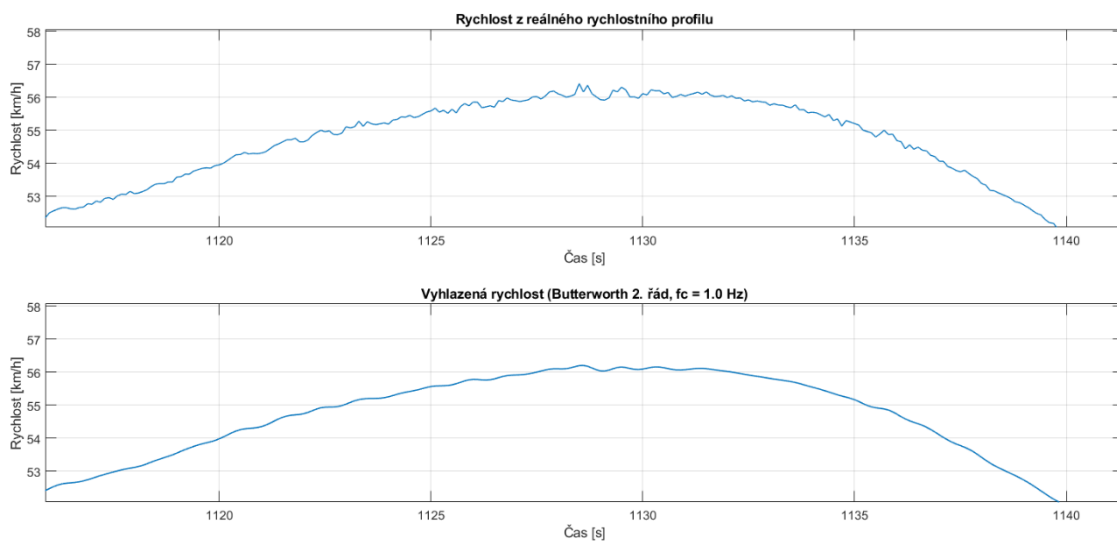
, kde  $P_{sběrač}$  [W] je výkon ze sběrače,  $E_{sběrače}$  [kWh] kumulovaná energie odebraná ze sběrače,  $\Delta t$  [s] je časový krok simulace.

- Dále jsou zde odvozené statistiky batVybito\_kWh a batNabito\_kWh (kolik kWh se celkem vybito z baterie a kolik se do ní rekuperací nabilo), motSpotreba\_kWh a motReku\_kWh (kolik energie motory spotřebovaly vs. kolik vygenerovaly rekuperací do sítě nebo baterie). Tyto veličiny se po skončení simulace využijí k sestavení energetické bilance.

- `predchoziZmarena_kWh` – pomocná proměnná pro výpočet zmařené energie na brzdovém odporu [kWh]. Uchovává hodnotu celkem zmařené (rekuperační nevyužitá) energie v odporu z předchozího kroku, aby bylo možné určit přírůstek v aktuálním kroku a z něj odvodit okamžitý výkon na odporu.

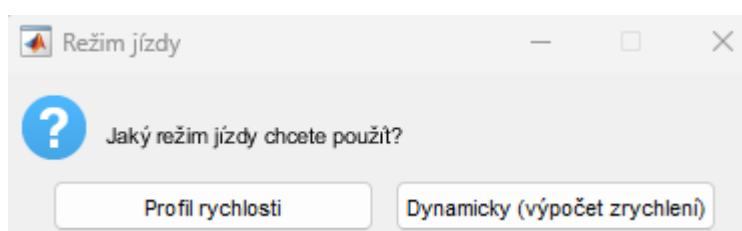
Třída `Simulace` implementuje několik metod, z nichž nejdůležitější je konstruktor a metoda `spustSimulaci` představující hlavní smyčku výpočtu. Dále obsahuje pomocné metody pro zpracování výsledků a úpravu vstupů:

- **Konstruktor `Simulace`** – provádí inicializaci simulace. Po vytvoření objektu vozidla (`obj.modelVozidla = ModelVozidla()`) automaticky načte parametry vozidla a data trasy (to zajišťuje konstruktor `ModelVozidla`, který se dotáže na typ vozidla (Obrázek 22) a soubor s profilem trasy). Poté třída `Simulace` vyžaduje výběr režimu jízdy, otevře dialogové okno (Obrázek 30) s dotazem, zda se má simulace provádět podle daného rychlostního profilu, nebo dynamicky vypočítávat pohyb vozidla. Podle odpovědi pak nastaví atribut `rezimJizdy` na `'profil'` nebo `'dynamicky'`. Program následně vyzve uživatele k výběru souboru s rychlostním profilem (podporovány jsou formáty Excel `.xlsx`, starší `.xls` i textový `.csv`). Vybraný soubor se načte do tabulky `RychlostniProfil`, v případě CSV se provede ošetření různých oddělovačů a případné rozdělení sloupců. Poté se z hodnot času v rychlostním profilu vypočítá `casovyKrok` rozdílem dvou hodnot času. Než se profil rychlosti použije, vyhledá se aplikací filtru Butterworth (2. řádu, dolní propust s mezní frekvencí 1 Hz), aby se odstranil vysokofrekvenční šum a drobné nespojitosti rychlosti.

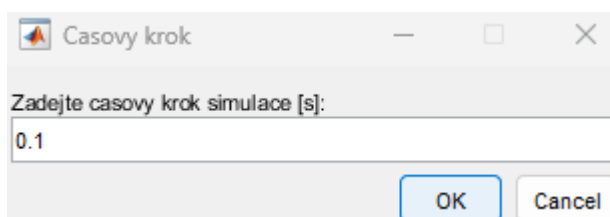


Obrázek 29 - Porovnání nevyhlazené a vyhlazené rychlosti rychlostního profilu na čase

Vyhlazené hodnoty rychlosti (v km/h) jsou poté uloženy zpět do tabulky profilu. V dynamickém režimu uživatel není vyzván ke načtení rychlostního profilu, protože se používají rychlostní limity trasy. Poté se program zeptá na požadovanou délku časového kroku simulace (Obrázek 31), výchozí hodnota je 0,1 s, uživatel však může zadat i hrubší či jemnější krok. Zadaný krok (kladné číslo) se uloží do `obj.casovyKrok`. Následně konstruktor připraví datovou strukturu `obj.logData` pro ukládání logovaných výsledků, vytvoří tabulku s předdefinovanými sloupci pro všechny sledované veličiny (čas, vzdálenost, rychlosti, výkony atd., celkem 21 sloupců) (Obrázek 28).



Obrázek 30 - Výběr jízdniho režmu simulace



Obrázek 31 - Zadávání časového kroku simulace při dynamickém režimu jízdy

- **spustSimulaci** – funkce s hlavní výpočetní smyčkou simulace. Tato metoda postupně simuluje jízdu vozidla po trase voláním modelu vozidla v každém kroku. Na začátku jsou resetovány klíčové proměnné: čas `celkovyCas` na 0 s, `aktualniPozice` na 0 m a rychlost na 0 m/s. Také se inicializuje pomocná hodnota `predchoziZmarena_kWh` přečtením dosud zmařené energie v brzdovém odporu (z objektu `modelVozidla.brzdovy_odpornik`). Vzápětí si metoda připraví lokální akumulátory pro energie (všechny nastavené na 0): `logEnergieZeSberace`, `logEnergieZBaterie`, `logEnergieMotoru`, `logEnergieAUX` a rovněž počítadla vybití/nabití baterie (`logBatVybito`, `logBatNabito`) a elektrické rekuperace (`logElektrickaRekuperace`). Následuje zjištění cílové vzdálenosti, kam až se bude simulovat, tj. délky celé jízdy. Pokud běží profilový režim, vypočte se nejprve kumulativní vzdálenost ujetá podle rychlostního profilu z hodnot rychlosti  $v$  (převedených do m/s) a známého časového kroku  $\Delta t$  se numerickou integrací (součtem  $v * \Delta t$ ) stanoví ujetá dráha v čase. Poslední hodnota této akumulace pak představuje celkovou délku profilu (poslední řádek tabulky `RychlostniProfil`). Tato hodnota se použije jako cílová vzdálenost simulace. V dynamickém režimu se naopak vezme maximální kilometrská poloha z dat trasy (tj. konec posledního úseku) a převede se na metry, to odpovídá délce celé naprogramované trasy.

Poté je spuštěna vlastní smyčka `while`, ta opakovaně běží, dokud `aktualniPozice` vozidla nedosáhne nebo nepřekročí cílovou vzdálenost. V každé iteraci (každém časovém kroku) proběhne následující sekvence výpočtů:

**1. Určení aktuálního úseku trasy:** Z aktuální ujeté vzdálenosti `aktualniPozice` se zjistí, ve kterém úseku trasy se vozidlo nachází. Program projde vektor kilometrských poloh všech úseků a najde index `idx` posledního úseku, jehož začátek je ve vzdálenosti  $\leq$  aktuální pozice (pokud vozidlo ještě neujelo ani první úsek, vezme index 1). Tím získáme řádek tabulky trasy `usek`, který odpovídá aktuální poloze vozidla. Z tohoto řádku se načte maximální povolená rychlost na daném úseku `rychlostLimit` (uváděna v km/h, v kódu převedena na m/s) a také informace, zda je na tomto úseku zastávka/zastavení – hodnota `zastaveni` (1 pokud zde musí vozidlo zastavit, 0 pokud ne) (Tabulka 2).

**2. Stanovení požadované rychlosti `v_pozadovana`:** Třída `Simulace` poté určí, jakou rychlostí by mělo vozidlo v aktuálním kroku jet, aby dodrželo omezení a plynule dosáhlo cílů jízdy

(dosažení zastávky, respektování rychlostního limitu apod.). Zde se postup liší podle režimu simulace:

- V profilovém režimu je požadovaná rychlost přímo dána předem definovaným profilem. Metoda vypočte index řádku v tabulce `RychlostniProfil` na základě uplynulého času (`profilIdx = floor(celkovyCas / casovyKrok) + 1`) a z tohoto řádku načte hodnotu rychlosti v km/h. Pokud by profil na daném místě neměl platnou hodnotu (NaN, může nastat u špatně připravených dat), ošetří se to použitím poslední známé rychlosti (nebo nulové, pokud jde o úplný začátek). Získaná rychlost v km/h se převede na metry za sekundu, a to je výsledná `v_pozadovana`. V tomto režimu Simulace neřeší logiku zastávek ani brzdění, protože předpokládá, že případné zastavení na trase je již obsaženo v rychlostním profilu (tzn. profil v místě zastávky klesne k 0 km/h na požadovanou dobu). Kód tedy v režimu profil žádným zvláštním způsobem nemění rychlost kvůli zastávce, jednoduše následuje předpis z profilu rychlosti, a pokud ten předepisuje zastavení (`rychlost = 0`), vozidlo zastaví.
- V dynamickém režimu Simulace požadovanou rychlost sama vypočítává. Základem je aktuální rychlostní limit úseku. Výchozí `v_pozadovana` se nastaví rovna `rychlostLimit` daného úseku. Následně se však přihlíží k blížícím se změnám na trase. Pokud existuje následující úsek (tj. aktuální úsek není poslední), načtou se údaje o něm: zejména rychlostní limit na dalším úseku `rychlostLimitNext` (v m/s), vzdálenost k příštímu úseku `vzdelenostNext` (resp. vzdálenost zbývající do konce aktuálního úseku) a zda na dalším úseku je zastávka `zastaveniNext`. Na základě toho se provede několik kontrol:
  - **Brzdění do nadcházející zastávky:** Pokud na příštím úseku je zastávka (`zastaveniNext == 1`) a dosud jsme nezačali brzdit (`rezimBrzdeniDoZastavky == false`), vypočte se, zda je již čas začít brzdit. K tomu se využije aktuální rychlost vozidla `obj.rychlost` (uloží se do `rychlostPredZacatkemBrzdeni`) a známé maximální zpomalení vozidla `maxDecelerace` (z `ParametryVozidla`). Odhad potřebné brzdné dráhy k nulové rychlosti se získá ze vztahu:

$$s = v^2 / \left( 2 * \frac{a_{maxDecelerace}}{0,5} \right) \quad (53)$$

,kde  $s$  je potřebná brzdná dráha [m],  $v$  je aktuální rychlost [m/s] a  $a_{maxDecelerace}$  je hodnota maximální decelerace z technických parametrů vozidla. Konstanta 0,5 je zde pro úmyslné snížení  $a_{maxDecelerace}$  a správnému dopočítání brzdění do zastávky, protože v modelu dochází k omezování akcelerace z důsledku dosažení maximálního výkonu motorů a pokud by zde nebyla tato konstanta, vozidlo by si špatně počítalo vzdálenost, kdy má začít brzdit, protože by počítalo  $s$  (v ten moment) nedosažitelnou maximální decelerací.

Program porovná tuto brzdnou vzdálenost s vzdáleností k příští zastávce  $s_{doZmeny}$ . Pokud již vzdálenost k zastávce  $\leq$  brzdná dráha, nastaví příznak  $rezimBrzdeniDoZastavky = true$ , čímž dá najevo, že od tohoto kroku vozidlo začíná kontrolovaně brzdit, aby zastavilo na určeném místě.

- **Pokračování brzdění do zastávky:** Pokud už jsme v režimu brzdění ( $rezimBrzdeniDoZastavky == true$ ), nastaví se požadovaná rychlost tak, aby vozidlo plynule dobrzdilo přesně na konci úseku (kde je zastávka). Toho dosáhneme vzorcem z rovnoměrně zpomaleného pohybu, z požadavku zastavit na vzdálenosti  $s_{doZmeny}$  se odvodí:

$$v_{požadovaná} = \sqrt{2 * \frac{a_{maxDecelerace}}{0,5} * s_{doZmeny}} \quad (54)$$

, kde  $v_{požadovaná}$  je požadovaná rychlost [m/s] s  $s_{doZmeny}$  je vzdálenost do zastávky [m] a konstanta 0,5 je zde opět ze stejného důvodu jako u výpočtu brzdné vzdálenosti, aby model zastavil vzhledem k vypočtené brzdné vzdálenosti.

Tato hodnota postupně klesá k nule, jak se vzdálenost ke stanici zmenšuje. Tento výpočet se aplikuje i tehdy, je-li v daném úseku místo zastavení typu „přechod pro chodce“ nebo „závora“, vozidlu se chová stejně ke všem typům zastávek jako k zastávce MHD.

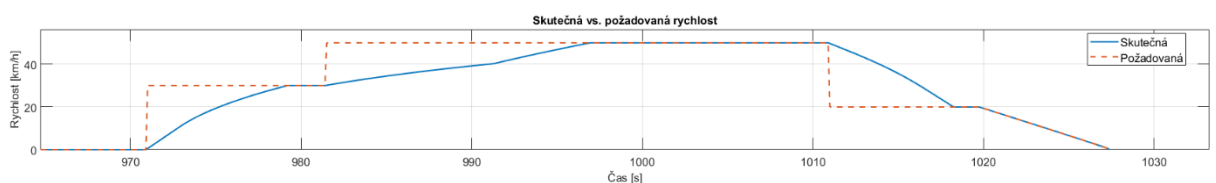
- **Brzdění před změnou rychlostního limitu:** Dále se kontroluje, zda na příštím úseku neklesá rychlostní limit. Pokud ano (tj.  $rychlostLimitNext < aktuální rychlostLimit$ ), vypočte se brzdná dráha potřebná pro zpomalení [m] z aktuální rychlosti na nový, nižší limit. Výpočet je obdobný:

$$s_{brzdění} = (v^2 - v_{následující}^2) / (2 * a_{maxDecelerace}) \quad (55)$$

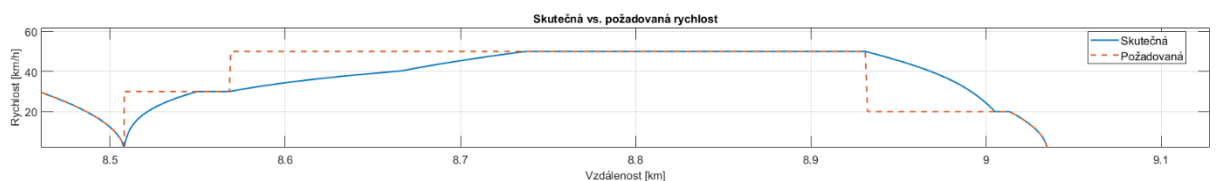
Je-li zbývající vzdálenost  $vzdálenostDoZmeny$  menší nebo rovna této brzdné dráze, upraví se  $v_{požadovana} = rychlostLimitNext$  (vozidlo začne s předstihem zpomalovat, aby nepřekročilo limit na začátku dalšího úseku).

Jak je vidět na Obrázek 32 a Obrázek 33, kdy vozidlo stojí v zastávce, poté se rozjíždí na rychlostní limit 30 km/h, kde chvíli udržuje konstantní rychlost, než dorazí do úseku s rychlostním limitem 50 km/h. Následuje úsek se sníženou rychlostí 20 km/h, takže začne vozidlo brzdit. Po krátké jízdě rychlostí 20 km/h dochází opět k zastavení do zastávky.

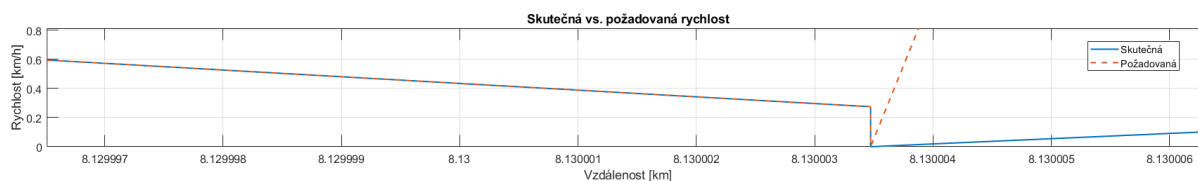
Na Obrázek 34 lze vidět, jak vozidlo brzdí do zastávky, v tomto případě se jedná na trase ve směru z Nádraží Veleslavin do Letiště o zastávku Terminál 1 C ve vzdálenosti 8,13 km. Skokové poskočení z rychlosti 0,3 km/h už je pouze způsobeno zaregistrováním příjezdu do zastávky.



Obrázek 32 - Graf skutečné a požadové rychlosti vůči času



Obrázek 33 - Graf skutečné a požadované rychlosti vůči ujeté vzdálenosti



Obrázek 34 - Detail zastavení modelu do zastávky ve vzdálenosti 8,13 km od počátku trasy

- **Zpracování zastávky na aktuálním úseku:** Nakonec se řeší případ, že právě v aktuálním úseku je zastávka (zastavení == 1). Pokud ji vozidlo dosud neobsloužilo (index úseku není v seznamu zastavkyObslouzene), je třeba provést simulaci zastavení. Podle typu zastávky, který je zadán číselně v souboru trasy, se nejprve určí doba stání dobaZastaveni v sekundách, která je uložena ve třídě Simulace ve switch/case struktuře:

Typ zastávky	Doba zastavení [s]
Zastávka MHD	20
Stání na konečné	5
Křižovatka řízená semaforem, odbočení s nutností dát přednost v jízdě	10
Křižovatka řízená semaforem, průjezd bez odbočení	15
Křižovatka řízená semaforem, průjezd s odbočením	8
Přechod pro chodce	5
Závora přes cestu	4

Tabulka 5 - Doby stání modelu podle typu zastávky

Poté nastává některá ze situací:

- Pokud vozidlo právě přijíždí do zastávky a ještě nestojí (stavZastavene == false), nastává zahájení zastavení, nastaví se příznak stavZastavene = true, uloží se aktuální čas do casZastaveniZacatek a požadovaná rychlost se vynutí na 0 m/s (vozidlo zastaví).
- Pokud vozidlo již stojí (stavZastavene == true), kontroluje se, zda už uplynula požadovaná doba čekání (celkovyCas - casZastaveniZacatek >= dobaZastaveni). Pokud ano, znamená to konec zastávky: příznak stavZastavene se vrátí na false (vozidlo se může znovu rozjet), index aktuální zastávky idx se přidá do seznamu obslužených zastavkyObslouzene a také se vynuluje příznak

rezimBrzdeniDoZastavky (aby případné brzdění do příští zastávky mohlo být znovu vyhodnoceno od nuly). Pokud doba čekání ještě neuplynula, stavZastavene zůstává true a vozidlo i nadále stojí (pro  $v\_pozadovana$  se tedy drží 0).

**3. Výpočet požadovaného zrychlení:** Po určení cílové rychlosti  $v\_pozadovana$  [m/s] (podle profilu nebo dynamiky) se spočte potřebné zrychlení či zpomalení:

$$a_{požadované} = (v_{požadovaná} - v) / \Delta t \quad (56)$$

, kde  $a_{požadované}$  je požadované zrychlení [m/s<sup>2</sup>] a  $v$  je aktuální rychlost vozidla [m/s]

Následně se aplikuje fyzikální omezení. Hodnotu akcelerace není dovoleno překročit nad hodnotu maximální akceleraci vozidla a pod hodnotu maximální decelerace (brzdné zpomalení). Proto se provede omezení:  $zrychleniPozadovane = \min(zrychleniPozadovane, maxAkcelerace)$  a zároveň  $zrychleniPozadovane = \max(zrychleniPozadovane, -maxDecelerace)$ . Tím je zajištěno, že model nebude požadovat nereálně prudké zrychlení ani překročení mezí brzdění daných vozidlem.

**4. Výpočet energetické bilance (volání ModelVozidla):** Po aktualizaci kinematiky vozidla přichází klíčový krok – výpočet toků výkonů a energií v systému modelu. Ten zajišťuje metoda třídy ModelVozidla `vypoctiEnergetickouBilanci`, kterou Simulace volá s následujícími argumenty:

- Časový krok `casovyKrok` [s].
- Režim jízdy `rezimJizdy` (profil/dynamický).
- Požadovaná rychlost  $v\_pozadovana$  [m/s].
- Požadované zrychlení `zrychleniPozadovane` [m/s<sup>2</sup>].
- Aktuální ujetá vzdálenost (v km, předává se `aktualniPozice/1000` pro dotazy na parametry trasy).
- Aktuální rychlost vozidla `rychlost` [m/s].

Výsledkem této volané funkce je aktualizovaný stav `obj.modelVozidla` (zejména nový stav baterie, případně vybitá/nabitá energie apod.) a sada výstupních hodnot popisujících energetickou bilanci v daném kroku. Konkrétně se vrací:

- `vykon_ze_sberace` [W] – okamžitý elektrický výkon odebraný z troleje (kladný při odběru, 0 pokud pod trolejí nejsme nebo z ní právě nic neteče).
- `vykon_z_baterie` [W] – okamžitý výkon čerpaný z baterie (kladný při vybíjení baterie, záporný při nabíjení rekuperací).
- `spotrebaMotorLocal` [kW] – okamžitý výkon na trakčních motorech. Kladná hodnota představuje výkon odebíraný motory (při pohonu), záporná naopak výkon vrácený motory do soustavy (při rekuperačním brzdění).
- `spotrebaAUX` [kW] – okamžitý příkon pomocných systémů (AUX). Ten závisí na okolní teplotě a na tom, zda je vozidlo pod trolejí či nikoli, a je již modelován v rámci třídy `A100_AUX` (Kapitola 2.2.6).
- `prikonMechW` [W] – okamžitý výkon, který putuje do mechanických brzd. Určen podílem mechanických brzd při každém brzdění.
- `F_kola` [N] – okamžitá celková tahová nebo brzdná síla působící na hnací kola. Kladná hodnota znamená záběr (akceleraci nebo jízdu do kopce), záporná hodnota brzdění či jízdu z kopce.

Třída `Simulace` po obdržení těchto hodnot dále využije některé z nich k rozšířenému výpočtu. Zjistí, kolik energie se právě zmařilo v brzdovém odporníku. Z objektu `obj.modelVozidla.brzdovy_odpornik` se opět odečte aktuální kumulovaná hodnota zmařené energie (`aktualniZmarena_kWh`) a porovná se s předchozí uloženou hodnotou `predchoziZmarena_kWh`. Jejich rozdíl `deltaZmarena_kWh` představuje energii (v kWh) rozptýlenou v odporu během tohoto kroku. Přepočtem na jouly a vydělením časem se získá odpovídající okamžitý výkon na odporu `prikonOdporW` [W]. Následně se proměnná `predchoziZmarena_kWh` aktualizuje pro další krok.

**5. Aktualizace stavu pohybu:** Ze získané hodnoty `F_kola` dojde k přepočtení skutečného zrychlení:

$$a_{skutečné} = \frac{F_{kola} - (F_{odporu} + F_{svahu})}{k * m} \quad (57)$$

, kde  $a_{skutečné}$  je přepočtené zrychlení [m/s<sup>2</sup>],  $F_{odporu}$  a  $F_{svahu}$  jsou jízdní odpory vozidla a odpory do svahu [N],  $k$  je součinitel rotujících hmot [-] a  $m$  je hmotnost vozidla [kg]

Ze skutečného zrychlení se numericky integruje pohyb vozidla, aktualizuje se rychlost a pozice:

$$v(k) = v(k - 1) + a_{skutečné} * \Delta t \quad (58)$$

$$s_{aktuální}(k) = s_{aktuální}(k - 1) + v * \Delta t \quad (59)$$

, kde  $k$  je simulační krok.

Tento výpočet posune vozidlo o kousek dál po trase a připraví podmínky pro příští iteraci.

**6. Logování dat:** V závěru iterace metoda sestaví jeden řádek tabulky `logData` s výsledky za aktuální časový krok a přidá jej do akumulární tabulky. Logují se například (Obrázek 28):

- Čas [s].
- Ujetá vzdálenost [m]
- Skutečná rychlost [km/h]
- Požadovaná rychlost [km/h]
- Stav nabití baterie [%]
- Příkon motorů [kW]
- Příkon AUX [kW]
- Index aktuálního úseku [-]
- Příznak zastavení
- Aktuální a nadcházející rychlostní limit [m/s]
- Požadované zrychlení [m/s<sup>2</sup>]
- Délka úseku [m]
- Výkon ze sběrače [W]
- Výkon z baterie [W]
- Indikátor přítomnosti pod trolejí
- Energie zmařená v brzdovém odporníku [kWh]
- Výkon mechanických brzd [W]

Zároveň se průběžně sumují energie do akumulátorů, pokud `vykon_z_baterie > 0`, přičte se do `logBatVybito` energie odebraná z baterie v tomto kroku (výkon [kW] přepočtený na kWh za  $\Delta t$ ), pokud je `vykon_z_baterie < 0`, přičte se do `logBatNabito` energie, která se do baterie nabíla. Podobně se akumuluje kladná/negativní složka výkonu motorů do `logEnergieMotoru`

a logElektrickaRekuperace, příkon pomocných pohonů do logEnergieAUX, výkon ze sběrače do logEnergieZeSberace a celkový tok z/do baterie do logEnergieZBaterie. Na konci každého kroku se také v objektu modelu vozidla vynuluje jednorázová proměnná rekuperovana\_aktualni (která indikovala, kolik energie se v tomto kroku rekuperačně uložilo do baterie).

**7. Inkrementace času:** Nakonec se zvýší celkový čas simulace:

$$t_{celkový}(k) = t_{celkový}(k - 1) + \Delta t \quad (60)$$

, kde  $k$  je simulační krok

, kde  $t_{celkový}$  je celkový čas [s] a smyčka přechází do další iterace (pokud již nebyl dosažen konec trasy/profilu). Pro orientaci o průběhu vypisuje Simulace do konzole zprávu každých 100 m jízdy (pokrok v procentech) (Obrázek 35).

```
⌘ Simulace probíhá: 200 m / 8960 m (2.2% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 300 m / 8960 m (3.3% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 400 m / 8960 m (4.5% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 500 m / 8960 m (5.6% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 600 m / 8960 m (6.7% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 700 m / 8960 m (7.8% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 800 m / 8960 m (8.9% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 900 m / 8960 m (10.0% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 1000 m / 8960 m (11.2% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 1100 m / 8960 m (12.3% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 1200 m / 8960 m (13.4% dokončeno)
⌘ Simulace probíhá: 1300 m / 8960 m (14.5% dokončeno)
```

Obrázek 35 - Hlášení průběhu simulace

Smyčka se ukončí, jakmile vozidlo překročí cílovou vzdálenost nebo (v profilovém režimu) pokud byl vyčerpán celý rychlostní profil. Po skončení hlavního cyklu metoda spustSimulaci uloží do vlastností objektu nasčítané energie (energieZeSberace, energieZBaterie, energieMotoru, energieAUX) a přepíše detailnější hodnoty o baterii z modelu vozidla (batVybito\_kWh a batNabito\_kWh), čímž zajistí, že statistika baterie odpovídá přesně internímu modelu baterie (zahrnujícímu účinnost a limity). Následně spustSimulaci automaticky vyvolá zpracování výsledků. Volá se metoda obj.vykresliVysledky, která vytvoří grafy z průběhu simulace, dále obj.vypisVysledky, která vypíše textovou rekapitulaci do konzole, a nakonec obj.ulozExcel, která uloží podrobný

log i souhrnné statistiky do Excel souboru. Po provedení těchto kroků sepíše zprávu o úspěšném ukončení (☑ Simulace ukončena! Výsledky jsou uloženy do složky Vysledky). Tím je simulace kompletní (Obrázek 36).

```

VÝSLEDKY SIMULACE|
Doba jízdy                : 00:22:54 [hh:mm:ss]
Ujetá vzdálenost          : 8.96 km
Stav baterie Start / End  : 80.00 % → 100.00 %
Min / Max SoC během jízdy : 62.95 % / 100.00 %

☑ ENERGETICKÁ STATISTIKA:
⚡ Energie odebraná ze sběrače      : 25.30 kWh
⚡ Trakční baterie - nabito (nabíjení) : 29.58 kWh
🔋 Trakční baterie - vybito (odběr)   : -17.58 kWh
🔌 Motory - spotřeba                  : 32.28 kWh
🔌 Motory - rekuperace                : -15.94 kWh
🔌 AUX systémy                        : 3.44 kWh
☐ Celková spotřeba (motor+aux-reku)   : 19.79 kWh
☑ Výsledky uloženy do souboru: Vysledky\20250630_205626_vysledky_simulace.xlsx
☑ Simulace ukončena! Výsledky jsou uloženy do složky Vysledky.

```

Obrázek 36 - Souhrnný výpis na konci simulace

- vykresliVysledky – tato metoda extrahuje z tabulky logData nejdůležitější průběhy a vykreslí je do dvou přehledových grafů. První graf používá čas [s] na vodorovné ose a obsahuje čtyři podgrafy: (1) skutečná a požadovaná rychlost v čase, (2) výkon rozptýlený v brzdovém odporu, v mechanických brzdách a příkon AUX v čase, (3) příkon trakčních motorů, baterie a sběrače v čase, (4) průběh SOC baterie a indikace jízdy pod trolejí v čase. Druhý graf zobrazuje tytéž závislosti vzhledem k ujeté vzdálenosti [km]. Grafické výstupy slouží k rychlému vyhodnocení průběhu jízdy, například lze vidět, v kterých úsecích vozidlo napájí trakci z troleje nebo z baterie, kde rekuperuje a kolik energie se případně zmaří v odporu, jak klesá stav baterie apod. Grafy se zobrazují na obrazovce a jsou připraveny k případnému uložení či dalšímu zpracování.

Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech:

- Skutečná rychlost – Okamžitá skutečná rychlost vozidla (výstup simulace).
- Požadovaná rychlost – Požadovaná rychlost podle jízdního profilu (pouze v režimu profil), nebo vypočtená (režim dynamický).

- AUX – Příkon všech pomocných spotřebičů vozidla (HVAC, měnič 400 VAC/50 Hz, palubní síť 24 VDC apod.), měřený na úrovni stejnosměrného meziobvodu (na vstupních svorkách měniče A100).
  - Motor – Celkový elektrický příkon obou trakčních motorů, měřený na svorkách trakčních měničů směrem k DC meziobvodu. Hodnota je kladná při odběru energie do motorů (při pohonu vozidla) a záporná při rekuperaci, kdy motory pracují generátoricky.
  - Baterie – Výkon na baterii (kladný při vybíjení – baterie dodává energii do systému, záporný při nabíjení – baterie absorbuje energii). Jde o okamžitý výkon na DC sběrnici vozidla spojené s baterií, tedy výkon, který baterie skutečně odevzdává nebo přijímá, už po zohlednění jejích vnitřních ztrát (účinností).
  - Sběrač – Výkon odebíraný ze sítě přes sběrač (pantograf) – kladný, pokud vozidlo odebírá energii z trolejového vedení, záporný není simulován, protože nerecuperujeme zpět do troleje. Měřeno na DC meziobvodu (na vstupu trakčního měniče).
  - Brzdový odporník – Výkon zmařený v brzdovém odporníku při rekuperaci, pokud je přebytečná energie, kterou nelze uložit do baterie či vrátit do sítě. Měřeno na stejnosměrném meziobvodu.
  - Mech. brzdy – Mechanické brzdy – výkon zmařený v mechanických brzdách na kolech (přeměněný na teplo v brzdových kotoučích) při brzdění, poměrová část při každém brzdění.
  - SOC (State of Charge) – Stav nabití trakční baterie v procentech (0 % = zcela vybitá, 100 % = plně nabitá baterie).
  - Pod trolejí – Indikátor jízdy pod trolejovým vedením: 1 pokud je aktuálně sběrač připojen k troleji (vozidlo napájeno z vedení), 0 pokud vozidlo běží z baterie (mimo trolejové vedení).
- **vypisVysledky** – jednoduchá metoda, která v konzoli vypíše souhrnné údaje o simulaci: celkový čas jízdy, konečnou rychlost, konečný stav nabití baterie a energetickou bilanci. V bilanci jsou jednotlivě uvedeny hodnoty: kolik energie (v kWh) bylo odebráno ze sběrače, kolik se odebralo z baterie a kolik se do ní naopak nabilo, jakou energii spotřebovaly trakční motory a kolik vygenerovaly rekuperací, kolik energie se zmařilo v brzdovém odporníku a jaká byla spotřeba pomocných systémů. Dále je spočtena celková spotřeba = (spotřeba motorů + AUX – rekuperace motorů), což představuje čistou energii, kterou vozidlo spotřebovalo z vnějších zdrojů. Tento textový výpis poskytuje přehledné číselné výsledky simulace.

- `ulozExcel` – tato metoda provádí export výsledků simulace do Excelu. Pokud ještě neexistuje složka `Vysledky`, vytvoří ji. Poté vygeneruje časové razítko (datum a čas simulace) a pod tímto unikátním názvem vytvoří Excel soubor. Do listu „Logovani“ uloží kompletní tabulku `logData` (včetně doplňkových sloupců spočítaných dodatečně, jako energie v jednotlivých krocích). Dále vytvoří druhý list „Souhrn“, kde sestaví tabulku souhrnných hodnot („Souhrn“) obsahující hlavní energetické ukazatele a parametry jízdy: vybitou/nabitou energii baterie, spotřebovanou/rekuperovanou energii motorů (zde se bere přímo hodnota `energieRekuperovana` z objektu `ModelVozidla` pro co nejpřesnější údaj), zmařenou rekuperaci v odporníku, spotřebu AUX, energii odebranou ze sběrače, celkovou hmotnost vozidla a okolní teplotu (pro připomenutí vstupních podmínek) a typ režimu simulace (profil/dynamický). Po úspěšném uložení vypíše metoda cestu k vytvořenému souboru. Uživatel tak má možnost dále pracovat s podrobnými výsledky v Excelu (např. provádět vlastní analýzy či generovat grafy nad rámec vestavěných).

### 3. VÝSLEDKY SIMULAČNÍHO MODELU

Simulační model spotřeby elektrické energie parciálního trolejbusu vyvinutý v prostředí MATLAB umožňuje dva odlišné režimy simulace jízdy: režim „Profil“ (sledování předem daného rychlostního průběhu) a „Dynamický“ (jízda podle rychlostních podmínek na předem definované trase). Každý z těchto režimů využívá jinou metodiku pro stanovení rychlostního průběhu vozidla během jízdy a tím pádem i odlišný postup výpočtu energetické bilance. Tato kapitola porovnává oba režimy z hlediska jejich principu fungování, metodologických rozdílů, výhod a nevýhod, přesnosti a typických oblastí využití. Následně obsahuje i výsledky simulací a analýzu modelu a jeho citlivost na změnu parametrů vozidla.

#### 3.1. Režim Profil

##### 3.1.1. Shrnutí režimu Profil

Režim Profil (simulace podle daného rychlostního profilu) provádí jízdu vozidla striktně podle předem definovaného průběhu rychlosti v čase. Na počátku simulace uživatel načte tabulku s časovým profilem rychlosti vozidla (například změřeným z reálné jízdy nebo vytvořeným dopravním plánovačem). Simulace si tento profil uloží a vypočte ze dvou po sobě jdoucích vzorků v rychlostním profilu časový rozdíl, který poté použije jako simulační krok. Před použitím ještě numericky vyhladí filtrem, aby neobsahoval nepřírozené skoky či šum v rychlosti. Tím odpadá potřeba rozhodovat o akceleraci/brzdění, protože vozidlo “sleduje” zadanou křivku rychlosti a veškeré další výpočty spočívají v určení energetických toků nutných k dodržení tohoto pohybu. Celý algoritmus profilového režimu je přehledně zobrazen ve vývojovém diagramu v Příloha A. Model pracuje na principu zpětného výpočtu, z fixně daného pohybu vozidla dopočítává požadovaný výkon v jednotlivých částech pohonu a zdrojích energie. Model zároveň respektuje fyzikální limity vozidla, pokud by profil vyžadoval nereálně vysoké zrychlení nebo výkon, ModelVozidla automaticky aplikuje omezení (například omezí točivý moment motoru či výkon odebíraný z baterie), kdy může vozidlo krátce přestat přesně sledovat reálný rychlostní profil a z toho důvodu se může odlišovat aktuální výpočet energií (Obrázek 25).

Z pohledu výstupů simulace poskytuje profilový režim detailní obraz energetické náročnosti pro daný scénář jízdy. Simulace kontinuálně zaznamenává hlavní veličiny v čase, zejména okamžitý výkon čerpaný z trolejového vedení vs. z baterie, dále výkony a příkony trakčních motorů a pomocných systémů, energii rekuperovanou trakčními motory do DC meziobvodu

a stav nabití baterie (SOC). Po ukončení jízdy program automaticky vygeneruje předpřipravené grafy a souhrnné statistiky. Grafické výstupy typicky zahrnují sadu křivek v čase (a alternativně i v závislosti na ujeté vzdálenosti), například průběh skutečné rychlosti (kopírující zadaný profil), dále průběhy výkonů v hlavních částech pohonu (trakční motor/pohon, baterie, trolej) a ztrát (brzdový odporník, mechanické brzdy) a také průběh stavu baterie v čase s vyznačením, kdy je vozidlo pod trolejí. Textový výstup a souhrn v tabulce poté kvantifikuje celkové hodnoty, například celkovou spotřebovanou energii, z toho kolik energie se odebralo z troleje a kolik z trakční baterie, kolik energie se rekuperovalo zpět (a kolik případně bylo zmařeno v odporníku) či o kolik pokleslo SOC baterie. Profilový režim tak umožňuje detailně vyhodnotit energetickou spotřebu konkrétní jízdy a poskytuje odpovědi na otázky typu „Kolik energie bylo potřeba na projetí dané trasy a odkud tato energie přišla?“ nebo „Jaký byl průběh zatížení vozidla a baterie v čase?“. Velkou předností tohoto režimu je věrnost konkrétnímu scénáři, simulace věrně reprodukuje průběh jízdy přesně tak, jak byl zadán, včetně případných nepravidelností (zdržení v provozu, odlišné délky stání na zastávkách apod.). To je velmi užitečné například pro validaci modelu, porovnáním výsledků simulace v režimu Profil s naměřenými daty lze ověřit, zda model správně predikuje spotřebu energie skutečného vozidla při stejné jízdě. Zároveň tento režim slouží k podrobným analýzám konkrétního průběhu jízdy, kdy umožňuje zpětně rozklíčovat, jaké dílčí procesy (trakční pohon, rekuperace, pomocné systémy) přispěly ke spotřebě energie v daných úsecích jízdy.

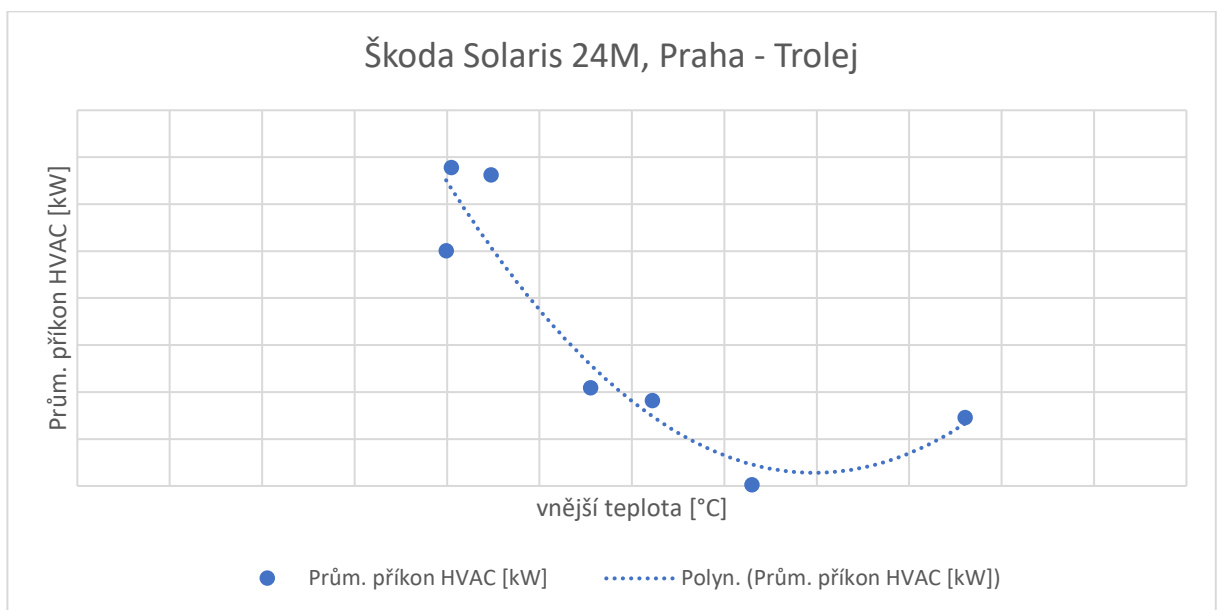
### **3.1.2. Výsledky simulace režimu Profil**

Výsledky simulace v režimu Profil jsou podrobně prezentovány v tabulkách 6 a 7, přičemž byla vždy vybrána jedna jízda z každého dne, kdy probíhalo měření. Jedná se vždy o jízdy bez zahrnutí nabíjení na konečných zastávkách. Ve všech jízdách se počítá s hmotností vozidla 29175 kg a obsazeností 45 pasažérů. Hodnota „Trakční motory netto“ je zde součet spotřebované (kladná hodnota) a rekuperované (záporná hodnota) energie motory.

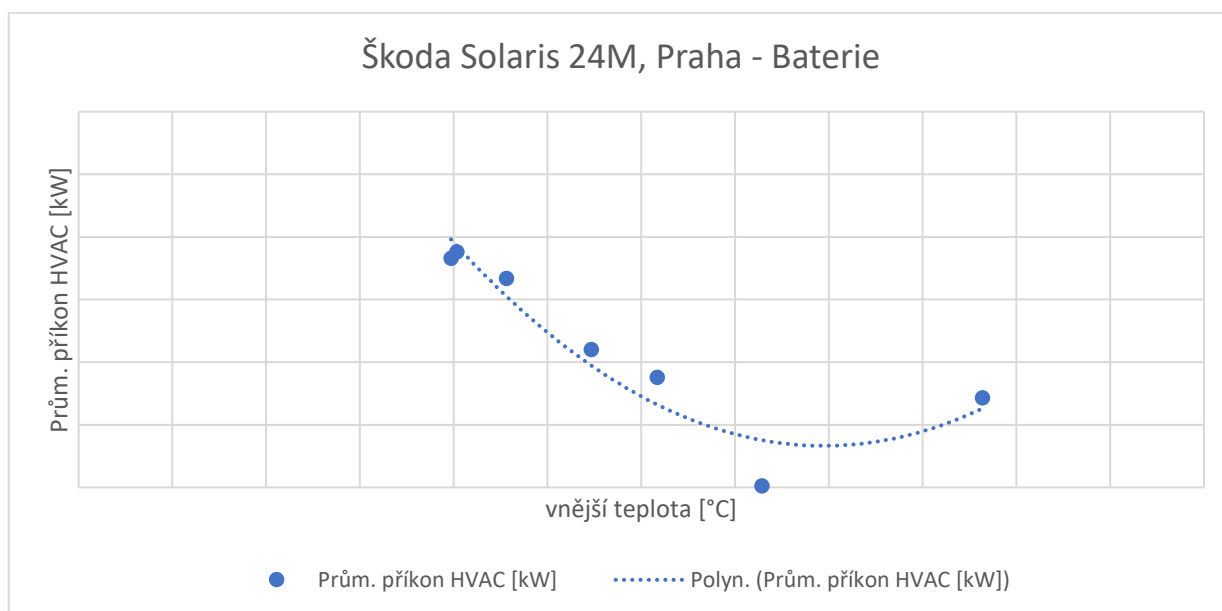
Odchytky hodnot simulace od hodnot naměřených na reálném vozidle v režimu Profil zpravidla nepřekračují hranici  $\pm 10\%$ . Výjimkou jsou však hodnoty nabití energie do trakční baterie a spotřeby pomocných systémů. Důvodem vyšších odchylek v hodnotách nabití energie do trakční baterie je především odlišnost v chování simulované baterie oproti reálné. V reálných jízdách totiž obvykle docházelo k výrazně hlubšímu vybíjení trakčního akumulátoru než v simulacích. To může indikovat skutečnost, že reálná baterie může mít nižší kapacitu, než

jakou uvádí výrobce. Oproti tomu simulovaná baterie, vycházející z ideálních hodnot výrobce, mohla působit, jako by měla vyšší dostupnou kapacitu

Další významnou odchylkou je vyšší spotřeba energie pomocných systémů. Ta vznikla zjednodušením jejich modelu použitím kvadratického proložení naměřených dat, jak bylo popsáno v kapitole 2.1.3. Toto zjednodušení vedlo v průměru ke zvýšení simulované spotřeby pomocných pohonů zhruba o 60 % napříč všemi sledovanými obdobími (teplotními podmínkami). Je však důležité zdůraznit, že v absolutních hodnotách se jedná přibližně o 2 kWh navíc na jízdu. Tento relativní rozdíl je však výrazně ovlivněn situacemi, kdy reálné vozidlo nepotřebovalo topit ani chladit (ideální venkovní teploty), ale simulace stále vykazovala určitou spotřebu. V těchto případech byl relativní rozdíl až kolem 200 %. Tato situace je vidět na Graf 1 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě pod trolejí a Graf 2 (níže), kde nejnižší naměřené hodnoty průměrných příkonů z reálných jízd HVAC jsou podstatně níže (modrý bod) v určitém rozmezí okolní ideální venkovní teploty, než zjednodušující polynom, kterým jsou hodnoty proloženy pro účel simulačního modelu. A protože HVAC je velmi dominantní složkou (a nejvíce se s okolní teplotou mění) celého příkonu AUX, pak právě v těchto teplotách dochází k největšímu zkreslení, ale maximálně o nižší jednotky kWh na celou jízdu. Naproti tomu, pokud reálné vozidlo skutečně používalo vytápění či chlazení intenzivněji, relativní rozdíly výsledků simulace oproti reálným měřením se již držely v rozmezí  $\pm 15\%$ .



Graf 8 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě pod trolejí (Převzato z kapitoly 2.1.3.)



Graf 9 - Závislost příkonu HVAC na okolní teplotě při jízdě na baterii (Převzato z kapitoly 2.1.3.)

Grafické výstupy z režimu Profil jsou přehledně uvedeny v Přílohách D, E, F, G. Grafy zde prezentují průběhy skutečné a požadované rychlosti, výkony všech klíčových systémových komponent a vývoj stavu nabití trakční baterie (SoC), a to včetně indikace přítomnosti vozidla pod trolejovým vedením. Každá varianta grafů je zobrazena ve dvou různých formátech: jednou s časovou osou simulace a podruhé v závislosti na ujeté vzdálenosti na trase. Obě varianty grafů jsou dostupné pro každý směr jízdy. Z grafů je patrné například zvýšení spotřeby pomocných pohonů při vjezdu vozidla pod trolejové vedení či situace, kdy dochází k maření výkonu brzdovým odporníkem v případě, že je trakční baterie plně nabitá, případně když je její nabíjecí výkon omezen nabíjecím limitem.

Režim "Profil" - Trasa Nádraží Veveřavín -> Letiště						
Průměrná teplota [°C]	8,9	7,37	17,06	29,4	3,54	0
Doba jízdy [hh:mm:ss]	00:19:56	0:18:53	0:21:08	0:21:21	0:19:59	0:20:07
Ujetá vzdálenost [km]	8,51	7,87	8,58	8,54	9,02	8,79
SOC na začátku [%]	92	100	98	100	98	97
SOC na konci [%]	88,72	88,75	89,86	86,71	84,45	85,06
SOC min. na trase [%]	88,31	88,43	89,59	86,43	84,16	85,06
SOC max. na trase [%]	100	100	100	100	100	100
Sběrač odebraná energie [kWh]	20,14	14,7	18,3	16,54	18,57	20,6
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	7,31	2,48	3,88	2,8	4,2	4,66
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-9,27	-9,23	-8,77	-10,78	-12,33	-11,82
Trakční motory netto [kWh]	17,45	14,59	18,05	16,89	18,31	16,71
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	4,89	5,3	3,07	6,74	7,94	10,73

Tabulka 6 - Data ze simulace v režimu Profil při jízdě ve směru Nádraží Veveřavín -> Letiště

Režim "Profil" - Trasa Letiště -> Nádraží Veleslavín						
Průměrná teplota [°C]	9,13	7,22	15,66	28,4	3,79	-0,56
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:19:28	0:23:43	00:20:47	0:23:03	0:21:33	0:21:00
Ujetá vzdálenost [km]	8,8	8,81	8,78	8,89	8,93	8,97
SOC na začátku [%]	54	80	84	98	94	82
SOC na konci [%]	67,69	97,22	100	100	100	98,7
SOC min. na trase [%]	40,69	62,98	69,86	82,15	76,04	61,29
SOC max. na trase [%]	67,69	97,22	100	100	100	98,7
Sběrač odebraná energie [kWh]	15,76	19,35	16,97	16,29	17,51	23,77
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	20,02	22,55	21,46	13,01	17,63	24,87
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-11,81	-12,22	-11,86	-11,81	-14,03	-14,85
Trakční motory netto [kWh]	10,76	9,71	11,31	10,76	10,52	10,24
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	3,21	6,56	3,12	6,47	8,32	11,59

Tabulka 7 - Data ze simulace v režimu Profil při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín

## 3.2. Režim Dynamický

### 3.2.1. Shrnutí režimu Dynamický

V režimu Dynamický není rychlostní průběh zadán předem, ale model jej generuje sám na základě zadané trasy a parametrů vozidla. Uživatel na začátku simulace poskytne pouze popis trasy (sekvence úseků s délkami, sklony, rychlostními omezeními a místy zastávek) a zvolí potřebné parametry simulace (např. časový krok výpočtu). Po nahrání trasy přechází model k vlastnímu výpočtu pohybu vozidla. Na začátku jízdy je rychlost nulová a vozidlo se rozjíždí. Algoritmus řízení jízdy pak v každém časovém kroku rozhoduje, jak vozidlo dále zrychluje, udržuje rychlost či brzdí. Toto rozhodování probíhá na základě informací o aktuálním stavu a výhledu na nejbližší úsek trasy. Model má k dispozici údaj o aktuální povolené rychlosti v daném úseku, o vzdálenosti k příští významné události (např. zastávce nebo změně rychlostního limitu) a o tom, zda na začátku příštího úseku musí vozidlo zastavit (zastávka, semafor apod.). Na základě těchto informací si model stanoví cílovou rychlost pro nejbližší okamžik. Pokud například není důvod brzdit ani omezovat rychlost, algoritmus vyhodnotí, že vozidlo může plynule akcelarovat až na maximální povolenou rychlost v aktuálním úseku a tomu přizpůsobí požadované zrychlení. Hodnoty požadovaného zrychlení (kladné i záporné) vycházejí z limitních technických hodnot pro vozidlo, takže to vede k tomu, že trakční motory pracují převážně na obálce maximálního momentu. Z tohoto důvodu se vozidlo velkou část simulace rozjíždí a brzdí s maximálním zrychlením, které dokáže vyvinout. Pokud se blíží zastávka, model už s předstihem zahájí zpomalování, spočítá si vzdálenost

potřebnou k plynulému zastavení z aktuální rychlosti a porovná ji se vzdáleností ke zastávce. Je-li zastávka dostatečně blízko, začne včas brzdit tak, aby vozidlo hladce zastavilo přesně u ní. Obdobně vyhodnocuje i blížící se změny rychlostního limitu když ví, že v dalším úseku bude povolená nižší rychlost, upraví předem akceleraci tak, aby se rychlost stihla včas snížit a nepřekročil se nový limit. Po zastavení v zastávce model zohlední nastavenou dobu stání (dle typu zastávky, např. přechod vs. konečná vs. semafor) a teprve po jejím uplynutí opět zahájí rozjezd. Tímto způsobem dynamický režim simuluje realistické řízení vozidla kdy vozidlo vždy akceleruje pokud může, dodržuje rychlostní omezení a kdykoliv to situace vyžaduje, včas brzdí do zastavení či na nižší rychlost. Celý proces generování rychlostního profilu za jízdy je rozpracován ve vývojových diagramech v přílohách Příloha B a Příloha C, které zobrazují rozhodovací logiku modelu v každém časovém kroku. Vnitřně probíhá výpočet velmi podobně jako v profilovém režimu, v každém kroku je určeno požadované zrychlení (na základě výše popsaných pravidel) a tomu odpovídající cílová rychlost vozidla, která se použije ve výpočetním jádru ModelVozidla. Rozdíl je tedy hlavně v tom, jak se stanoví hodnota zrychlení, kdy místo čtení z tabulky profilu ji určuje rozhodovací algoritmus. Vše ostatní (výpočet trakčních sil, momentů, výkonů) již probíhá shodně, ModelVozidla obdrží požadované zrychlení a příslušně dopočítá energetickou bilanci pohonu v daném kroku. Také v dynamickém režimu model nepřekročí fyzikální limity vozidla, je-li požadováno vyšší zrychlení, než dovolují parametry (výkon motorů, maximální decelerace při brzdění apod.), omezí ho na dovolenou hodnotu. Tím je zajištěno, že generovaný jízdní průběh je dosažitelný v praxi a simulace nepožaduje po vozidle nerealistické výkony. Výsledkem dynamického režimu je kompletní syntetický rychlostní profil pro celou trasu, ten však nevzniká předem, ale plynule se tvoří až během simulace v reakci na situace, které na trase nastávají (omezení rychlosti, zastávky, sklon apod.).

Z hlediska výstupů poskytuje dynamický režim obdobné informace jako režim profilový. Po dokončení simulace model opět nabídne přehledové grafy s časovým průběhem rychlosti, výkonů a dalších veličin (a obdobný graf v závislosti na vzdálenosti). Tyto grafy umožňují vizuálně posoudit, jak vozidlo jelo a lze z nich vyčíst například úseky, kde vozidlo čerpalo energii z troleje vs. z baterie, kde rekuperovalo a kolik výkonu se případně muselo zmařit v brzdovém odporníku, nebo jak se v průběhu cesty měnil stav nabití baterie. Kromě grafů je k dispozici také souhrnný výpis klíčových ukazatelů celé jízdy v číslech, obdobně jako u profilového režimu. Dynamický režim tedy umožňuje zodpovědět otázky jako „Kolik energie

by trolejbus spotřeboval na této trase bez vlivu dopravy?“ nebo „Jaký průběh rychlosti a spotřeby představuje jízda podle dopravních pravidel a možností vozidla?“. Velkou výhodou je, že k simulaci není potřeba žádný konkrétní naměřený profil rychlosti a model tak lze spustit pro libovolnou trasu a vozidlo, stačí znát jejich parametry. Díky tomu je dynamický režim vhodný pro zkoumání různých hypotetických scénářů a what-if analýz. Lze snadno měnit konfiguraci (např. upravit počet zastávek, rychlostní limity, kapacitu baterie či výkon motorů) a simulovat vždy nový průběh jízdy, nicméně nedokáže simulovat provoz na trase, nebo styl jízdy řidiče (jízda s výběhy).

### **3.2.2. Výsledky simulace režimu Dynamický**

Podobně jako v režimu Profil jsou výsledky pro simulační režim Dynamický uvedeny v tabulkách 8 a 9, kde byla vždy vybrána jedna reprezentativní jízda z každého měřicího dne. Ve všech jízdách se počítá s hmotností vozidla 29175 kg a obsazeností 45 pasažérů. Hodnota „Trakční motory netto“ je zde součet spotřebované (kladná hodnota) a rekuperované (záporná hodnota) energie motory.

Odchyly hodnot simulace režimu Dynamický od dat naměřených reálnou jízdou se obvykle pohybují v rozmezí  $\pm 15\%$ . Průměrná doba jízdy je přibližně o 15-20 % kratší než u reálných jízd, což je způsobeno tím, že v dynamickém režimu se počítá s jízdou na technických limitech vozidla pro zrychlení (akcelerace i decelerace).

Grafické výstupy pro režim Dynamický jsou k dispozici v přílohách H, I, J a K. Jízdy zobrazené v těchto grafech byly provedeny za stejných podmínek jako v režimu Profil. Grafy ukazují průběh synteticky generovaného rychlostního profilu, kdy požadovaná rychlost funguje jako obálka, které vozidlo dosahuje prostřednictvím průběžné regulace aktuální rychlosti. Kvůli intenzivní deceleraci jsou navíc na grafech patrné výrazné špičkové hodnoty výkonu mařeného v brzdovém odporníku.

Režim "Dynamický" - Trasa Nádraží Veleslavín -> Letiště						
Průměrná teplota [°C]	8,9	7,37	17,06	29,4	3,54	0
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:16:05	0:17:46	0:20:08	0:15:51	0:17:07	0:17:48
Ujetá vzdálenost [km]	8,6	8	8,75	8,6	9,04	8,77
SOC na začátku [%]	92	100	98	100	98	97
SOC na konci [%]	88,03	87,59	90,55	87,74	86,85	85,63
SOC min. na trase [%]	87,25	86,44	89,59	87,03	85,88	85,58
SOC max. na trase [%]	100	100	100	100	100	100
Sběrač odebraná energie [kWh]	20,29	16,5	22,64	18,44	20	20,35
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	7,43	2,49	4,31	2,56	3,86	4,65
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-9,81	-9,93	-8,78	-9,92	-10,55	-11,47
Trakční motory netto [kWh]	18,44	16,07	20,35	18,16	18,51	16,93
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	3,87	4,93	2,93	4,94	6,77	9,51

Tabulka 8 - Data ze simulace v režimu Dynamický při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště

Režim "Dynamický" - Trasa Letiště -> Nádraží Veleslavín						
Průměrná teplota [°C]	9,13	7,22	15,66	28,4	3,79	-0,56
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:25:53	0:16:43	0:16:57	0:16:26	0:17:20	0:15:12
Ujetá vzdálenost [km]	8,96	8,93	8,96	8,96	8,96	8,96
SOC na začátku [%]	54	80	84	98	94	82
SOC na konci [%]	82,64	93,98	100	100	100	88,34
SOC min. na trase [%]	36,04	63,65	69,94	82,3	76,63	62,86
SOC max. na trase [%]	82,64	93,98	100	100	100	88,34
Sběrač odebraná energie [kWh]	26,28	17,53	18,5	14,55	17,57	16,99
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	30,31	21,14	21,09	13,47	16,93	17,27
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-13,24	-12,75	-11,49	-12,27	-13,33	-13,47
Trakční motory netto [kWh]	14,08	11,43	12,78	11,39	11,71	10,38
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	4,5	4,66	2,54	4,59	6,64	8,21

Tabulka 9 - Data ze simulace v režimu Dynamický při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín

### 3.3. Porovnání režimů Profil a Dynamický

Otázka přesnosti simulace úzce souvisí s povahou obou režimů. Profilový režim poskytuje výsledky, které jsou velmi přesné ve vztahu ke konkrétnímu zadanému průběhu jízdy. Pokud je rychlostní profil získán z reálného měření, simulace v režimu Profil by měla věrně reprodukovat spotřebu energie pro tuto jízdu, zahrnuje totiž všechny drobné výkyvy rychlosti, skutečné doby rozjezdů a zastavení, i případné neplánované změny tempa (např. krátká zpomalení kvůli provozu). Z tohoto hlediska je profilový režim cenný pro validaci modelu vůči realitě nebo pro podrobnou analýzu konkrétní jízdy. Přesnost je ovšem podmíněna kvalitou vstupního profilu rychlosti, pokud by data profilu byla nepřesná nebo nereprezentativní, budou tomu odpovídat i výsledky simulace. Také platí, že profilový režim neumožňuje odchýlení od zadaného průběhu, není schopen improvizovat, takže nedokáže

simulovat jiný scénář, než který je v datech. To sice není problém při analýze daného scénáře, ale omezuje to možnost obecnější predikce.

Dynamický režim naproti tomu usiluje o přesnost v obecném smyslu. Simuluje jízdu podle fyzikálních zákonitostí a typických pravidel provozu, což by mělo odpovídat „průměrnému“ průběhu jízdy na trase. Jeho výsledky mohou být považovány za predikci spotřeby za jistých ideálních či definovaných podmínek. Přesnost dynamického režimu bude vždy nižší než režim „profil“, protože skuteční řidiči a reálný provoz mohou vykazovat odlišnosti jako například řidič nemusí vždy akcelarovat maximálně, může reagovat opožděně, nebo naopak brzdít jinak než model předpokládá. Dynamický režim tyto individuální odchylky nezachytí, protože pracuje s idealizovanými pravidly. Proto se může výsledná spotřeba energie i značně odlišovat od skutečnosti, zejména pokud realita zahrnuje více neefektivit (např. zbytečné zastávky navíc, delší stání, kolísání rychlosti vlivem provozu apod.), které dynamický model nepostihne, nebo naopak pokud řidič v praxi jede úsporněji než idealizovaný model (např. pomalejšími rozjezdy nebo používáním výběhů). Celkově lze říci, že dynamický režim poskytuje spolehlivý odhad spotřeby za definovaných podmínek, avšak jde o odhad teoretický, jeho přesnost v konkrétní situaci je dána tím, nakolik se daná situace blíží předpokladům modelu.

Oba simulační režimy mají své přednosti i omezení, které je předurčují k odlišnému využití:

- Výhody režimu „Profil“:
  - **Věrnost konkrétnímu scénáři:** Umožňuje detailně analyzovat spotřebu energie pro konkrétní jízdu, jejíž rychlostní průběh je znám. Je ideální pro porovnání simulace s naměřenými daty z provozu a ověření, že model správně predikuje spotřebu.
  - **Jednodušší implementace výpočtu:** Nemusí řešit rozhodování o brzdění a akceleraci, protože využívá přímo daná zadaný průběh rychlosti. Díky tomu je menší riziko numerických chyb v řízení vozidla. Model se soustředí na výpočet energetických toků pro zadaný profil.
  - **Zachycení vlivů provozu:** Protože profil může obsahovat reálné kolísání rychlosti (např. zácpy, zdržení na křižovatkách), simulace v režimu Profil tyto jevy zahrne do výpočtu spotřeby. To umožňuje vyhodnotit vliv nepravidelností

provozu na energii, pokud máme pro porovnání například jízdu v dopravní špičce a mimo ní.

- Nevýhody režimu „Profil“:
  - **Nutnost dostupnosti rychlostního profilu:** Režim vyžaduje kvalitní vstupní data. Pokud nejsou k dispozici naměřené záznamy rychlosti nebo vhodné simulované profily, nelze jej použít. Pro každou novou trasu nebo scénář je třeba získat nový profil.
  - **Omezená obecnost:** Výsledky platí přímo jen pro zadaný průběh jízdy. Nelze snadno aplikovat na jiné podmínky (např. jinou jízdní strategii, odlišný počet zastavení) bez vytvoření nového profilu. To omezuje využití pro predikci what-if analýzy.
- Výhody režimu „Dynamický“:
  - **Univerzálnost a flexibilita:** Nevyžaduje žádný konkrétní rychlostní záznam, stačí zadat parametry vozidla a definici trasy. Lze jej tedy použít pro libovolnou trasu či vozidlo, i tam, kde nejsou dostupná data z provozu. Model sám vygeneruje průběh jízdy.
  - **Možnost scénářových analýz:** Protože dynamický režim umožňuje snadno měnit podmínky (např. přidat či ubrat zastávky, měnit rychlostní limity, zkoumat různé strategie jízdy), je vhodný pro what-if analýzy a hledání úspor. Umožňuje odpovědět na otázky typu „Jaká by byla spotřeba, kdyby se snížil počet zastavení nebo zvýšila rychlost na určitém úseku?“, „Bude stačit kapacita baterie na projetí trasy?“.
  - **Respektování fyzikálních limitů a standardů:** Simulace v dynamickém režimu vždy dodržuje běžná pravidla jízdy (rychlostní limity, nutnost brzdit do zastavení). Výsledný profil je tedy realistický a dosažitelný. Zároveň lze model snadno přizpůsobit různým vozidlům. Při změně parametrů (hmotnost, výkon motoru, kapacita baterie) bude generovaný průběh automaticky reflektovat tyto odlišnosti.

- Nevýhody režimu „Dynamický“:
  - **Absence konkrétních provozních vlivů:** Model neregistruje nahodilé jevy jako jsou nepředvídaná zdržení, kolony, lidský faktor řidiče apod. Jízda je simulována podle definovaného scénáře.
  - **Složitější validace:** Ověřit správnost dynamického modelu může být složitější, protože nemá přímo odpovídající jeden konkrétní záznam jízdy. Validace obvykle probíhá porovnáním statistických ukazatelů nebo celkové spotřeby s reálem, nikoliv přímým porovnáním celého průběhu rychlosti. To klade větší nároky na důvěryhodnost jednotlivých komponent modelu (motor, baterie, apod.).
  - **Výpočetní náročnost:** Ačkoliv i dynamický model lze obvykle spočítat rychle, jeho algoritmus je komplexnější (zahrnuje rozhodování v každém kroku). U velmi dlouhých simulací nebo rozsáhlých analýz citlivosti tak může čas výpočtu narůstat více než u profilového režimu. Pro běžné použití v MATLABu však typicky zůstává výpočet dobře zvládnutelný. V případě mého počítače (Procesor: Intel Core i5-13600KF 3,5 GHz, 32GB RAM) trvá simulace na trase o délce 8,96 km v režimu „Profil“ 27,1 s (simulováno 21:33 minut jízdy) a v režimu „Dynamický“ 30,1 s (simulováno 22:57 minut jízdy).
  - **Potenciální odchylky od individuální reality:** Každý řidič či dopravní situace se může lišit, dynamický režim simuluje průměrné chování. V určitých případech tak nemusí vystihnout specifický styl jízdy (např. agresivnější či naopak úspornější způsob řízení konkrétního řidiče) nebo nestandardní situace (např. úmyslné vynechání zastávky, pomalá jízda kvůli technickému problému atd.), pokud nejsou zahrnuty v pravidlech modelu.

V tabulkách Tabulka 10 a Tabulka 11 je porovnání hodnot mezi oběma režimy v rámci jedné jízdy, pro každý směr jedna tabulka. Ve všech jízdách se počítá s hmotností vozidla 29175 kg a obsazeností 45 pasažérů. „Trakční motory netto“ je zde součet spotřebované (kladná hodnota) a rekuperované (záporná hodnota) energie motory. Kvůli kratší době jízdy o 15-20 % oproti režimu Profil dochází ke snížení spotřeby pomocných pohonů, které jsou závislé na zadané konstantní teplotě (v rámci simulace jedné jízdy jedním směrem) a tedy procentuální hodnota rozdílu jejich

spotřeby mezi režimy je téměř identická ke zkrácení procentuální délky jízdy mezi režimy.

Sloupec rozdíl je v tomto případě procentuální rozdíl počítaný podle vzorce:

$$\text{Rozdíl} = \frac{\text{Hodnota}_{\text{dynamický}} - \text{Hodnota}_{\text{profil}}}{\text{Hodnota}_{\text{profil}}} * 100 [\%] \quad (61)$$

Trasa Nádraží Veleslavin -> Letiště			
Průměrná teplota = 3,54 °C	Profil	Dynamický	Rozdíl [%]
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:19:59	0:17:07	-14,35
Počet zastávek na trase	10	11	10,00
Ujetá vzdálenost [km]	9,02	9,04	0,22
SOC na začátku [%]	98	98	0,00
SOC na konci [%]	84,45	86,85	2,84
SOC min. na trase [%]	84,16	85,88	2,04
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	18,57	20	7,70
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	4,2	3,86	-8,10
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-12,33	-10,55	-14,44
Trakční motory netto [kWh]	18,31	18,51	1,09
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	7,94	6,77	-14,74

Tabulka 10 - Porovnání hodnot ze simulace mezi oběma simulačními režimy na trase Nádraží Veleslavin -> Letiště

Trasa Letiště ->Nádraží Veleslavin			
Průměrná teplota = 3,79 °C	Profil	Dynamický	Rozdíl [%]
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:21:33	0:17:20	-19,57
Počet zastávek na trase	14	15	7,14
Ujetá vzdálenost [km]	8,93	8,96	0,34
SOC na začátku [%]	94	94	0,00
SOC na konci [%]	100	100	0,00
SOC min. na trase [%]	76,04	76,63	0,78
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	17,51	17,57	0,34
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	17,63	16,93	-3,97
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-14,03	-13,33	-4,99
Trakční motory netto [kWh]	10,52	11,71	11,31
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	8,32	6,64	-20,19

Tabulka 11 - Porovnání hodnot ze simulace mezi oběma simulačními režimy na trase Letiště -> Nádraží Veleslavin

### 3.4. Vliv parametrů vozidla na výsledky simulací

Tato kapitola se zaměřuje na analýzu výsledků simulačního modelu při různých jízdních scénářích a nastaveních. Cílem je zjistit, jak změny vybraných vstupních parametrů ovlivní energetickou náročnost parciálního trolejbusu. Porovnáním těchto případů získáme přehled o tom, které faktory mají zásadní vliv na spotřebu elektrické energie a případně i na jízdní dobu. Tato sensitivní analýza simulačního modelu zároveň ověří, zda model reaguje realisticky na změny podmínek a poskytne podklady pro doporučení ohledně provozu vozidla (např. vliv obsazenosti či stylu jízdy na spotřebu).

#### 3.4.1. Vliv obsazenosti vozidla na spotřebu energie

Simulace byla provedena pro různou obsazenost vozidla, aby se vyhodnotil vliv hmotnosti trolejbusu na spotřebu energie.

Tabulka 12 (a obdobně Tabulka 13 pro opačný směr jízdy) porovnává výsledky pro plně obsazený vůz (180 cestujících), poloviční obsazenost (90 cestujících) a prázdný vůz. „Trakční motory netto“ je zde součet spotřebované (kladná hodnota) a rekuperované (záporná hodnota) energie motory. Z tabulek lze jasně vidět, že ve směru z Nádraží Veveslavín na Letiště dojde ke zpomalení doby jízdy, protože vozidlo musí překonávat větší jízdní odpory a motory omezují maximální zrychlení a musí pracovat na vyšší výkon delší dobu, což se projeví ve zhoršení hodnot téměř všech měřených veličin až o nižší desítky procent. Ruku v ruce s tímto jde i mnohem hlubší vybití baterie během jízdy a nižší SOC baterie na konci trasy. V případě trasy druhým směrem (z Letiště na Nádraží Veveslavín) se však odlehčením vozidla délka trasy prodlužuje, vlivem topografie trasy (Obrázek 2), kdy při cestě z kopce váha vozidla pomáhá ke zrychlení.

Hodnoty rozdílu v tabulkách jsou vždy počítány podle vzorce:

$$\text{Rozdíl} = \frac{\text{Hodnota}_{\text{obsazenostAktuální}} - \text{Hodnota}_{\text{obsazenostMaximální}}}{\text{Hodnota}_{\text{obsazenostMaximální}}} * 100 \quad (62)$$

Trasa Nádraží Veveslavín -> Letiště, Režim jízdy "Dynamický" Simulační krok = 0,1 s					
Průměrná teplota = 3,54 °C			Rozdíl [%]		Rozdíl [%]
Celková hmotnost vozidla [kg]	39330	31875	-18,95	25800	-34,40
Počet cestujících (75 kg / osobu)	180	90	-50,00	0	-100,00
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:17:20	0:17:11	-0,87	0:17:03	-1,63
Ujetá vzdálenost [km]	9,04	9,04	0,00	9,04	0,00
SOC na začátku [%]	98	98	0,00	98	0,00
SOC na konci [%]	81,02	85,12	5,06	88,42	9,13
SOC min. na trase [%]	79,66	84,02	5,47	87,59	9,95
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	26,15	22,07	-15,60	17,94	-31,40
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	4,69	4,16	-11,30	3,55	-24,31
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-14,88	-11,89	-20,09	-9,3	-37,50
Trakční motory netto [kWh]	27,87	21,47	-22,96	15,69	-43,70
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	6,86	6,8	-0,87	6,75	-1,60

Tabulka 12 - Vliv obsazenosti vozidla na spotřebu v dynamickém režimu na trase Nádraží Veveslavín -> Letiště

Trasa Letiště ->Nádraží Veveslavín, Režim jízdy "Dynamický" Simulační krok = 0,1 s					
Průměrná teplota = 3,79 °C			Rozdíl [%]		Rozdíl [%]
Celková hmotnost vozidla [kg]	39330	31875	-18,95	25800	-34,40
Počet cestujících (75 kg / osobu)	180	81	-55,00	0	-100,00
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:15:28	0:16:24	6,03	0:17:21	12,18
Ujetá vzdálenost [km]	8,96	8,96	0,00	8,96	0,00
SOC na začátku [%]	94	94	0,00	94	0,00
SOC na konci [%]	99,68	100	0,32	100	0,32
SOC min. na trase [%]	70,74	74,38	5,15	78,59	11,10
SOC max. na trase [%]	99,68	100	0,32	100	0,32
Sběrač odebraná energie [kWh]	20,42	17,69	-13,37	16	-21,65
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	20,29	18,59	-8,38	15,43	-23,95
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-16,88	-14,99	-11,20	-11,83	-29,92
Trakční motory netto [kWh]	17,49	13,63	-22,07	9,83	-43,80
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	5,92	6,23	5,24	6,65	12,33

Tabulka 13 - Vliv obsazenosti vozidla na spotřebu v dynamickém režimu na trase Letiště -> Nádraží Veveslavín

### 3.4.2. Vliv časového kroku simulace v dynamickém režimu

Zde je posouzeno, jak volba délky simulačního kroku v dynamickém režimu ovlivňuje výsledky modelu. Simulace byla spuštěna s různým časovým krokem (od kroku 0,01 s až po 1 s). Tabulka 14 a Tabulka 15 zobrazují rozdíly v naměřených veličinách. Hlavním cílem je ověřit stabilitu a přesnost modelu, tedy zda hrubší krok (větší než základních 0,1 s) výrazně nedeformuje výsledky, nebo naopak zda jemnější krok nepřináší již jen minimální odchylky. Z porovnání je patrné, že změna časového kroku má na většinu výstupů jen malý vliv.

I poměrně hrubý krok 1 s způsobil odchyly v řádu jednotek procent – např. simulovaná doba jízdy se při 1 s kroku zkrátila o 2 % oproti výchozímu kroku 0,1 s. Tyto rozdíly lze považovat za poměrně malé, což svědčí o tom, že model je numericky stabilní a už krok 0,1 s je dostatečně přesný pro účely simulace. Z praktického hlediska to znamená, že lze volit kompromis mezi rychlostí výpočtu a přesností, kdy mírné zvětšení kroku značně zrychlí simulaci a přitom výsledky nezkreslí víc než o pár procent. Test tak potvrzuje správnost nastavení simulačního kroku a důvěryhodnost výstupů dynamického režimu modelu.

Ve všech jízdách se počítá s hmotností vozidla 29175 kg a obsazeností 45 pasažerů. „Trakční motory netto“ je zde součet spotřebované (kladná hodnota) a rekuperované (záporná hodnota) energie motory.

Rozdíl je zde počítán podle vzorce:

$$\text{Rozdíl} = \frac{\text{Hodnota}_{\text{krokAktuální}} - \text{Hodnota}_{\text{krok0,1s}}}{\text{Hodnota}_{\text{krok0,1s}}} * 100 \quad (63)$$

Trasa Nádraží Veleslavín -> Letiště, Režim jízdy "Dynamický"							
			Rozdíl [%]		Rozdíl [%]		Rozdíl [%]
Průměrná teplota = 3,54 °C							
Délka simulačního kroku [s]	0,1	0,01	-90,00	0,5	400,00	1	900,00
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:17:07	0:17:10	0,29	0:16:58	-0,88	0:16:47	-1,95
Ujetá vzdálenost [km]	9,04	9,04	0,00	9,04	0,00	9,04	0,00
SOC na začátku [%]	98	98	0,00	98	0,00	98	0,00
SOC na konci [%]	86,85	86,75	-0,12	87,28	0,50	87,84	1,14
SOC min. na trase [%]	85,88	85,79	-0,10	86,26	0,44	86,77	1,04
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00	100	0,00	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	20	20,05	0,25	19,69	-1,55	19,4	-3,00
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	3,86	3,85	-0,26	3,94	2,07	4,07	5,44
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-10,55	-10,59	0,38	-10,38	-1,61	-10,16	-3,70
Trakční motory netto [kWh]	18,51	18,61	0,54	18,01	-2,70	17,39	-6,05
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	6,77	6,79	0,30	6,72	-0,74	6,64	-1,92
Časová náročnost simulace na PC [s]	20,9	296,5	1318,66	4,6	-77,99	2,5	-88,04

Tabulka 14 - Vliv časového kroku simulace na měřené veličiny v dynamickém režimu na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště

Trasa Letiště -> Nádraží Veveslavín, Režim jízdy "Dynamický"							
Průměrná teplota = 3,79 °C			Rozdíl [%]		Rozdíl [%]		Rozdíl [%]
Délka simulačního kroku [s]	0,1	0,01	-90,00	0,5	400,00	1	900,00
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:17:20	0:17:23	0,29	0:17:09	-1,06	0:17:00	-1,92
Ujetá vzdálenost [km]	8,96	8,96	0,00	8,96	0,00	8,96	0,00
SOC na začátku [%]	94	94	0,00	94	0,00	94	0,00
SOC na konci [%]	100	100	0,00	100	0,00	100	0,00
SOC min. na trase [%]	76,63	76,51	-0,16	77,15	0,68	77,86	1,61
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00	100	0,00	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	17,57	17,67	0,57	17,06	-2,90	16,4	-6,66
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	16,93	16,98	0,30	16,69	-1,42	16,47	-2,72
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-13,33	-13,38	0,38	-13,09	-1,80	-12,87	-3,45
Trakční motory netto [kWh]	11,71	11,83	1,02	11,14	-4,87	10,41	-11,10
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	6,64	6,66	0,30	6,57	-1,05	6,51	-1,96
Časová náročnost simulace na PC [s]	24,1	352,9	1364,32	5,1	-78,84	2,6	-89,21

Tabulka 15 - Vliv časového kroku simulace na měřené veličiny v dynamickém režimu na trase Letiště -> Nádraží Veveslavín

### 3.4.3. Vliv větší a menší akcelerace/decelerace na spotřebu energie a jízdní dobu

V této podkapitole je zkoumán dopad různého jízdního stylu na spotřebu energie a dobu jízdy. Pomocí simulace v režimu „Dynamický“ se mění maximální povolená akcelerace a decelerace vozidla, což odpovídá agresivnějšímu vs. plynulejšímu způsobu jízdy.

Tabulka 16 představuje scénáře s omezenou akcelerací: 100 % = 1,5 m/s<sup>2</sup>, sníženo na 66 % = 1 m/s<sup>2</sup> a 33 % = 0,5 m/s<sup>2</sup>. Zatímco Tabulka 17 analogicky ukazuje vliv omezení maximální brzděné decelerace: 100 % = -1,4 m/s<sup>2</sup>, sníženo na 66 % = -0,925 m/s<sup>2</sup> a 33 % = -0,463 m/s<sup>2</sup>. Ve všech jízdách se počítá s hmotností vozidla 29175 kg a obsazeností 45 pasažérů. Výsledky ukazují, že omezení akcelerace, tedy pomalejší, plynulejší rozjezdy, mají vliv na dobu jízdy, která se podle předpokladů prodlouží. Snížení maximální akcelerace na 66% má však vliv na měřené veličiny pouze minimální, do jednoho procenta (s výjimkou spotřeby pomocných pohonů, které jsou při stejných teplotních podmínkách konstantní a odvíjejí se od délky jízdy). Stejně tak hodnoty veličiny Trakční motory netto, která představuje součet spotřebované (kladné) a rekuperované (záporné) energie trakčními motory, vykazuje pokles, protože motory nejsou se sníženou akcelerací tolik namáhány na výkon. Při simulaci snížení maximální decelerace je vidět vliv na dobu jízdy opačný, se snižující decelerací se doba jízdy snižuje, protože vozidlu tolik nekolísá rychlost při změně rychlostního limitu, pokud je mezi úseky kde se mění rychlost. Stejně tak při snížené deceleraci nemohou motory tolik rekuperovat a snižuje se hodnota Trakční motory netto a hodnota energie nabitá do baterie. Celkově při této

simulaci vyplývá, že snížení maximální decelerace má výraznější vliv na model než snížení maximální akcelerace (větší procentuální rozdíly vůči 100 % hodnotě maximální decelerace).

Trasa Nádraží Veleslavín -> Letiště, Režim jízdy "Dynamický"					
Průměrná teplota = 3,54 °C			Rozdíl [%]		Rozdíl [%]
Hodnota maximální akcelerace [%]	100	66,67	-33,33	33,34	-66,66
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:17:07	0:17:23	1,56	0:18:22	7,30
Ujetá vzdálenost [km]	9,04	9,04	0,00	9,04	0,00
SOC na začátku [%]	98	98	0,00	98	0,00
SOC na konci [%]	86,85	86,85	0,00	86,72	-0,15
SOC min. na trase [%]	85,88	85,88	0,00	85,75	-0,15
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	20	19,93	-0,35	19,65	-1,75
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	3,86	3,87	0,26	3,78	-2,07
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-10,55	-10,55	0,00	-10,55	0,00
Trakční motory netto [kWh]	18,51	18,36	-0,81	17,86	-3,51
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	6,77	6,88	1,62	7,28	7,53

Tabulka 16 - Vliv snižování maximální akcelerace modelu na měřené veličiny na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště

Trasa Nádraží Veleslavín -> Letiště, Režim jízdy "Dynamický"					
Průměrná teplota = 3,54 °C			Rozdíl [%]		Rozdíl [%]
Hodnota maximální decelerace [%]	100	66,67	-33,33	33,34	-66,66
Doba jízdy [hh:mm:ss]	0:17:07	0:16:33	-3,31	0:14:56	-12,76
Ujetá vzdálenost [km]	9,04	9,04	0,00	9,04	0,00
SOC na začátku [%]	98	98	0,00	98	0,00
SOC na konci [%]	86,85	86,82	-0,03	87,58	0,84
SOC min. na trase [%]	85,88	85,96	0,09	87,07	1,39
SOC max. na trase [%]	100	100	0,00	100	0,00
Sběrač odebraná energie [kWh]	20	19,14	-4,30	17,18	-14,10
Tr. baterie nabitá energie [kWh]	3,86	3,52	-8,81	2,75	-28,76
Tr. baterie vybitá energie [kWh]	-10,55	-10,22	-3,13	-9	-14,69
Trakční motory netto [kWh]	18,51	18,15	-1,94	17,07	-7,78
Pom.pohony spotřebovaná energie [kWh]	6,77	6,5	-3,99	5,92	-12,56

Tabulka 17 - Vliv snižování maximální decelerace modelu na měřené veličiny na trase Nádraží Veleslavín -> Letiště

## ZÁVĚR

V rámci této práce byl vyvinut simulační model spotřeby elektrické energie parciálního trolejbusu, který byl následně ověřen porovnáním simulace se záznamy reálné jízdy. Model je implementován v prostředí MATLAB s využitím objektově orientovaného programování a skládá se z řady propojených modulů reprezentujících jednotlivé části vozidla (trakční motory, baterie, sběrač, brzdový odporník, pomocné pohony apod.). Výpočet využívá principu „backward-facing“ modelu – vychází z požadovaného pohybu vozidla a zpětně z něj odvozuje potřebný výkon v jednotlivých komponentách. Vstupem simulace je buď naměřený rychlostní profil jízdy, nebo definice trasy a jízdních parametrů, na jejichž základě model sám vygeneruje průběh jízdy. Model v diskrétních krocích počítá potřebnou hnací sílu na kolech, okamžitý odběr nebo dodávku výkonu z troleje či trakční baterie, spotřebu výkonu pomocných pohonů, rekuperaci do baterie a případné maření výkonu v odporníku. Díky tomu dokáže simulace poskytnout detailní energetickou bilanci vozidla a sledovat vývoj stavu nabití baterie (SOC) v čase.

Vytvořený model je navržen jako univerzální a flexibilní nástroj. Umožňuje simulovat jízdu jednoho vozidla na libovolné trase při různých podmínkách, kdy uživatel může měnit před začátkem simulace parametry vozidla (hmotnost, výkon motorů, kapacitu baterie), profil trasy (sklony, rychlostní limity, polohu zastávek) i provozní vlivy (venkovní teplotu ovlivňující topení/klimatizaci, počáteční stav nabití baterie apod.). Simulační model nabízí dva režimy simulace. Režim „Profil“, kdy vozidlo následuje zadaný rychlostní profil (z reálného měření), tento režim se hodí pro detailní analýzu konkrétní jízdy a ověření shody modelu s realitou. a režim „Dynamický“, kdy model počítá průběh jízdy sám podle zadaných pravidel (maximální akcelerace/brzdění, rychlostní omezení apod.), ten je vhodný pro predikci spotřeby bez naměřeného rychlostního profilu a zkoumání hypotetických scénářů. Režim „Dynamický“ pracuje s agresivnějším stylem jízdy, kvůli využívání maximálních technických hodnot vozidla pro zrychlení (kladné i záporné) a poskytuje spíše odhad spotřeby za definovaných podmínek, takže jeho výsledky se od reality mohou lišit vlivem nepostihnutých jevů (např. Provoz na trase, odlišné chování řidiče, výběhy). Oba režimy se tedy doplňují, profilový pro přesnou analýzu a validaci, dynamický pro obecné odhady a „what-if“ analýzy různých variant provozu.

Simulační model byl aplikován na konkrétní trolejbusovou linku č.59 Dopravního podniku hlavního města Praha (Nádraží Veveslavín ↔ Letiště Václava Havla) a výsledky naznačují vysokou shodu s reálným provozem. V režimu Profil se odchylky většiny

sledovaných veličin od naměřených dat držely okolo  $\pm 10\%$ , což potvrzuje, že model dokáže věrně simulovat skutečnou spotřebu elektrické energie. Určité větší rozdíly se objevily u nabíjení/vybíjení trakční baterie a spotřeby pomocných systémů, což je přisuzováno zjednodušením v modelu – reálná baterie mohla mít nižší využitelnou kapacitu, než se předpokládalo, a jednoduchý model topení/klimatizace nadhodnocuje spotřebu při teplotách, kdy reálné vozidlo téměř nevyužívá HVAC. Tyto odchylky však představují jen nižší jednotky kWh na jízdu a při teplotách kdy je HVAC používáno (větší zima či horko) se rozdíly snižují na přijatelnou úroveň (do cca 15 %). Lze tedy říci, že model je dostatečně přesný a spolehlivý pro hodnocení spotřeby energie v provozu parciálních trolejbusů.

Simulace rovněž umožnily vyhodnotit spotřebu v různých scénářích a hledat faktory s největším vlivem. Potvrdilo se, že vyšší hmotnost vozidla (plná obsazenost cestujícími) zvyšuje energetickou náročnost provozu, kdy plně obsazený tříčlánkový trolejbus spotřebuje o desítky procent více energie trakčními motory než prázdný vůz a jeho trakční baterie se během jízdy výrazně hlouběji vybije. Ve stoupáních vede větší hmotnost k delší jízdě a vyššímu odběru proudu z troleje i baterie, zatímco při jízdě z kopce naopak těžší vozidlo může díky větší setrvačnosti zkrátit dobu jízdy. Analýza vlivu jízdního stylu pak ukázala, že plynulejší akcelerace (nižší žádané zrychlení) má jen malý dopad na spotřebu energie napříč sledovanými veličinami. Pomalejší rozjezdy prodlouží cestu časově, ale uspoří jen jednotky procent energie. Naproti tomu omezení brzdění (nižší maximální decelerace, tedy šetrnější jízda s menším využíváním intenzivní brzdy) se projevilo výrazněji, vozidlo nemůže tolik rekuperovat, takže klesá i nabitá energie do trakční baterie. Celkově se tedy jako nejvýznamnější faktory spotřeby potvrdily hmotnost vozidla a způsob jízdy, zatímco například mírná změna délky simulačního časového kroku nemá na výsledky podstatný vliv.

Vypracovaný simulační model může pomoci dopravním podnikům a plánovačům provozu dopředu odhadnout energetické požadavky při nasazení parciálních trolejbusů na různých linkách, ověřit, zda kapacita baterií postačuje pro zamýšlené trasy, nebo nalézt provozní opatření ke snížení spotřeby (např. úpravou jízdního řádu, počtu zastávek či jízdního stylu řidičů). Model je koncipován obecně, takže jej lze přizpůsobit i pro jiné typy vozidel včetně čistých elektrobusů. Díky modulární struktuře a vstupním parametrům lze snadno analyzovat „what-if“ scénáře – například vyhodnotit, jak by zvýšení obsazenosti, změna trasy nebo jiná strategie jízdy ovlivnily odběr energie z troleje a z baterie. Tím může model posloužit při rozhodování o další elektrifikaci autobusových linek a při hledání optimálních provozních

podmínek pro minimalizaci spotřeby a emisí. V neposlední řadě může být nástroj využit i pro školení řidičů, aby porozuměli vlivu svého stylu jízdy na energetickou bilanci vozidla.

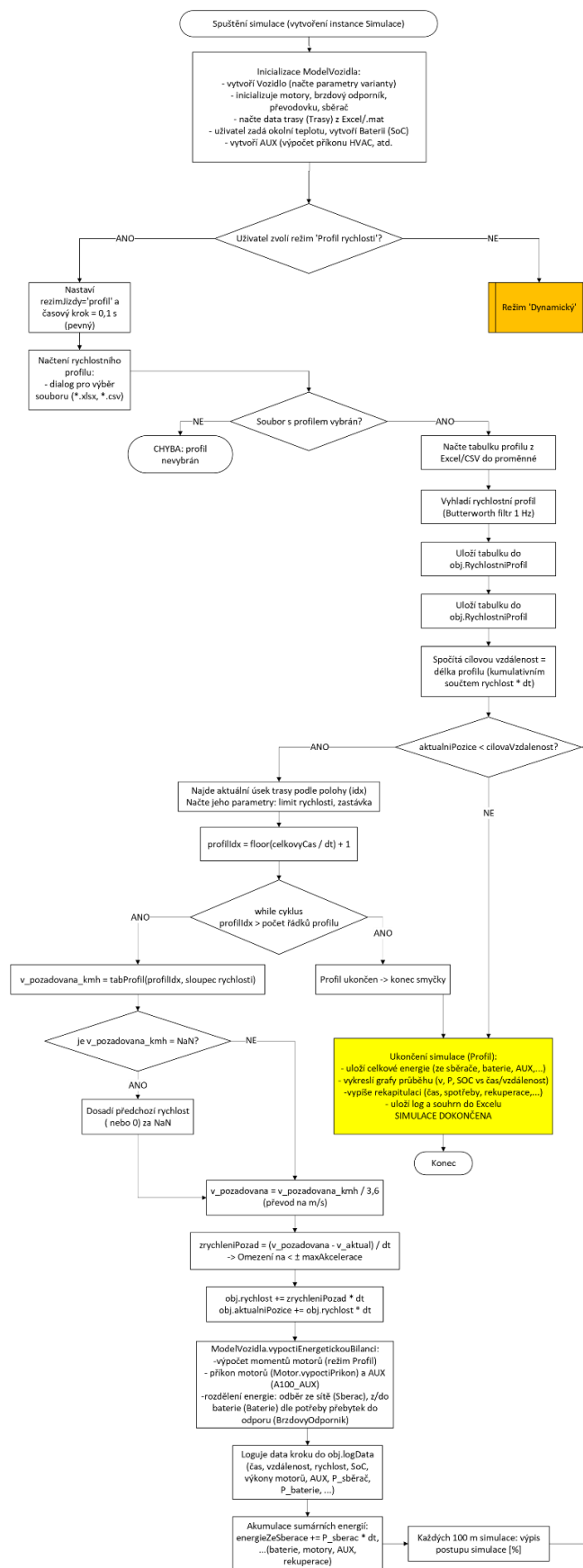
## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *DPP zahájil stavbu trolejbusové tratě na Letišti Václava Havla Praha*. Online. Dopravní podnik hlavního města Praha. 2023. Dostupné z: [https://www.dpp.cz/spolecnost/pro-media/tiskove-zpravy/detail/278\\_2029-dpp-zahajil-stavbu-trolejbusove-trate-na-letiste-vaclava-havla-praha](https://www.dpp.cz/spolecnost/pro-media/tiskove-zpravy/detail/278_2029-dpp-zahajil-stavbu-trolejbusove-trate-na-letiste-vaclava-havla-praha). [cit. 2025-07-03].
- [2] BEJŠOVEC, Adam. *Na Letišti Václava Havla nejdelším trolejbusem v ČR. Svůj pravidelný provoz zahájila nová linka 59, nahrazuje autobusovou linku 119*. Online. Český Rozhlas - Rádio Praha. 2024. Dostupné z: <https://praha.rozhlas.cz/na-letiste-vaclava-havla-nejdelsim-trolejbusem-v-cr-svuj-pravidelny-provoz-9189619>. [cit. 2025-07-03].
- [3] NEVYHOŠTĚNÝ, Jan. *Odkoušeno, připraveno. Ostrý start megatrolejbusů se blíží, nadrozměr přinesl drobné úpravy*. Online. Zdopravy.cz. 2024. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/odzkoušeno-připraveno-ostry-start-megatrolejbusu-se-blizi-nadrozmer-prinesl-drobne-upravy-196380/>. [cit. 2025-07-03].
- [4] *Z Veleslavína na letišti: kapacitně a bezemisně nejdelším trolejbusem*. Online. Praha 6. 2024. Dostupné z: [https://www.praha6.cz/zpravodajstvi/z-veleslavina-na-letiste-kapacitne-a-bezemisne-nejdelsim-trolejbusem\\_68262.html](https://www.praha6.cz/zpravodajstvi/z-veleslavina-na-letiste-kapacitne-a-bezemisne-nejdelsim-trolejbusem_68262.html). [cit. 2025-07-03].
- [5] STEHLÍK, Jakub a PLÍHAL, Jakub. *Nejdelší v Česku. Svezli jsme se novým trolejbusem, má skoro 25 metrů*. Online. Aktuálně.cz. 2024. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/elektromobilita/fotky-dlouhe-trolejbusy-z-prazskeho-letiste-znacka-skoda-sol/r~1777669adbc711eeb589ac1f6b220ee8/>. [cit. 2025-07-03].
- [6] *Na Letišti Václava Havla Praha nově trolejbusem. Má číslo 59, nahrazuje autobusovou linku 119*. Online. Letišti Praha. 2024. Dostupné z: <https://www.prg.aero/na-letiste-vaclava-havla-praha-nove-trolejbusem-ma-cislo-59-nahrazuje-autobusovou-linku-119>. [cit. 2025-07-03].
- [7] *Škoda-Solaris Trollino 24*. Online. Imhd.sk. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/1033/%C5%A0koda-Solaris-Trollino-24>. [cit. 2025-07-03].
- [8] SŮRA, Jan. *DPP ukázal první 24 metrů dlouhý trolejbus pro linku na letišti*. Online. Zdopravy.cz. 2023. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/dpp-ukazal-prvni-24-metru-dlouhy-trolejbus-pro-linku-na-letiste-149510/>. [cit. 2025-07-03].
- [9] *Solaris přivezl na Busworld tři produktové novinky*. Online. BUS Portál. 2019. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/solaris-privezl-na-busworld-tri-produktove-novinky-15759>. [cit. 2025-07-03].
- [10] MAY, Tiana. *Prague Orders 20 Bi-Articulated Trolleybuses from Solaris and Škoda*. Online. Bus-News. 2022. Dostupné z: <https://bus-news.com/prague-orders-20-bi-articulated-trolleybuses-from-solaris-and-skoda/>. [cit. 2025-07-03].
- [11] *Denní provoz*. Online. Dopravní podnik hlavního města Praha. Dostupné z: <https://www.dpp.cz/cestovani/doprava-na-letiste/denni-provoz>. [cit. 2025-07-03].

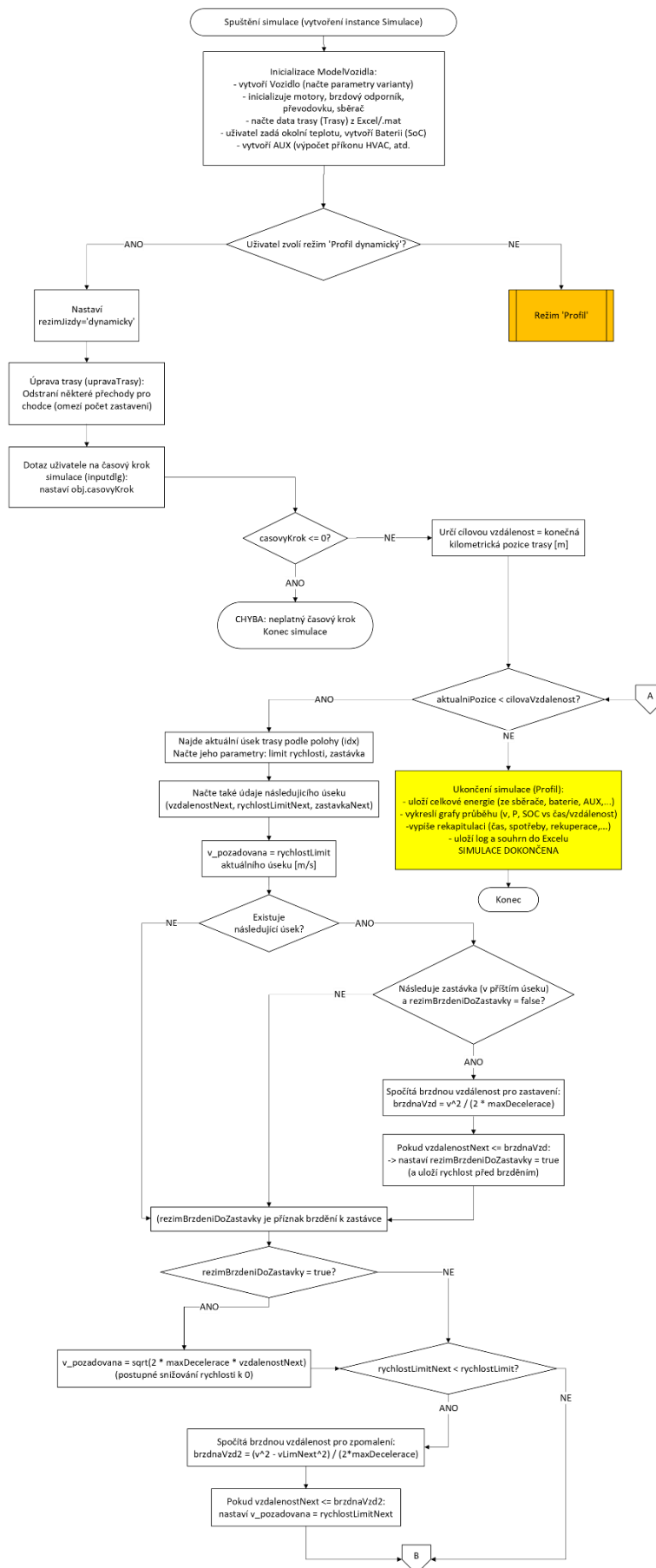
- [12] SZOTKOWSKI, David. *Studie energetiky provozu linky s velkokapacitními trolejbusy s pomocným akumulátorovým napájením*. Online, bakalářská práce. Univerzita Pardubice, 2024-09-10T06:39:47Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84130>. [cit. 2025-07-03].

## SEZNAM PŘÍLOH

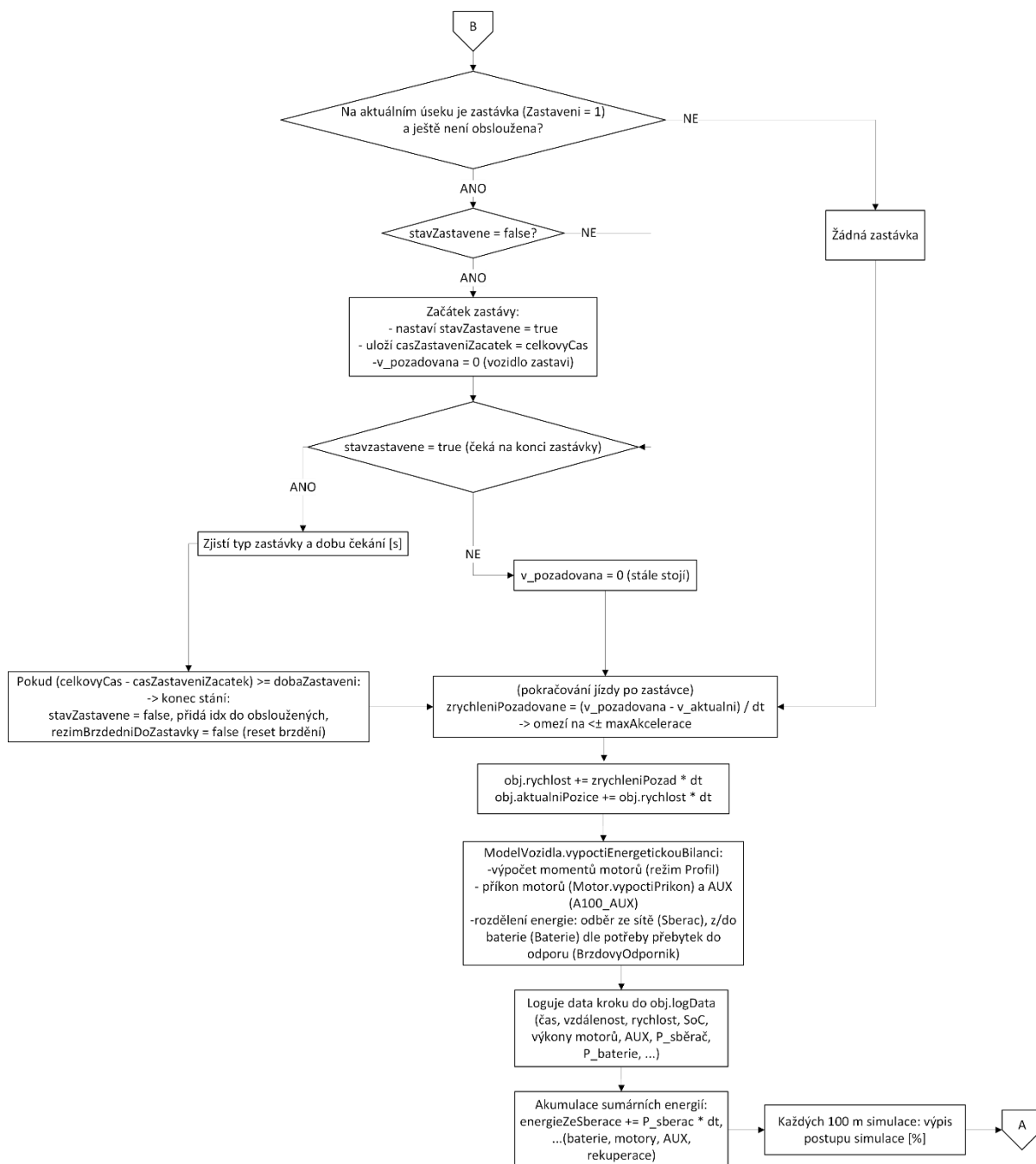
Příloha A - Vývojový diagram simulačního režimu Profil.....	119
Příloha B - Vývojový diagram simulačního režimu Dynamický, část 1. ....	121
Příloha C - Vývojový diagram simulačního režimu Dynamický, část 2. ....	121
Příloha D - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči času simulace při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 %, ..... [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	122
Příloha E - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 %, ..... [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	123
Příloha F - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči času simulace při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 %, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	124
Příloha G - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 %, ..... [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	125
Příloha H - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči času simulace při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 % , Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	126
Příloha I - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Nádraží Veleslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 % , Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	127
Příloha J - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči času simulace při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 % , Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	128
Příloha K - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavín, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 % , Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92].....	129



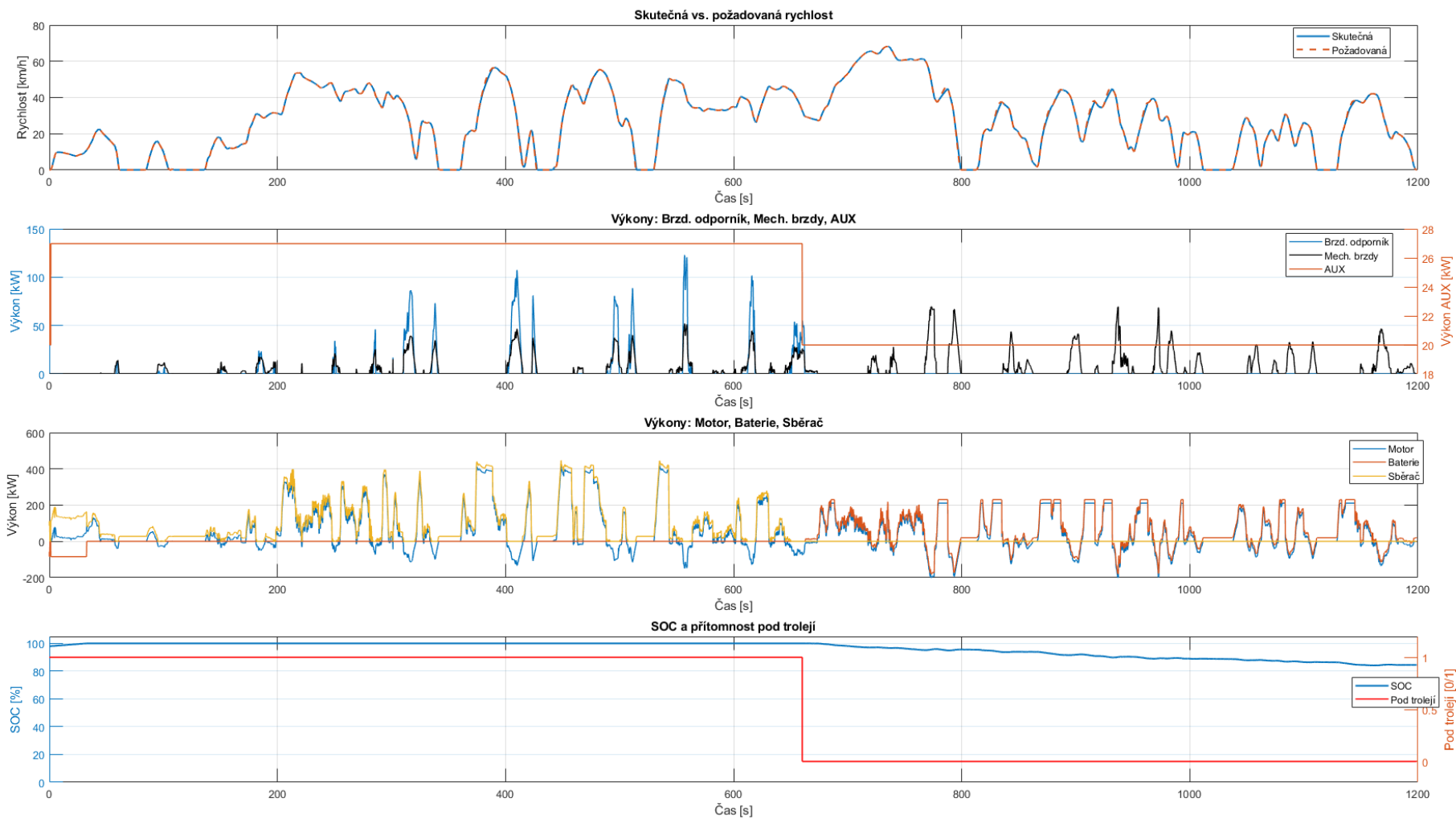
Příloha A - Vývojový diagram simulačního režimu Profil



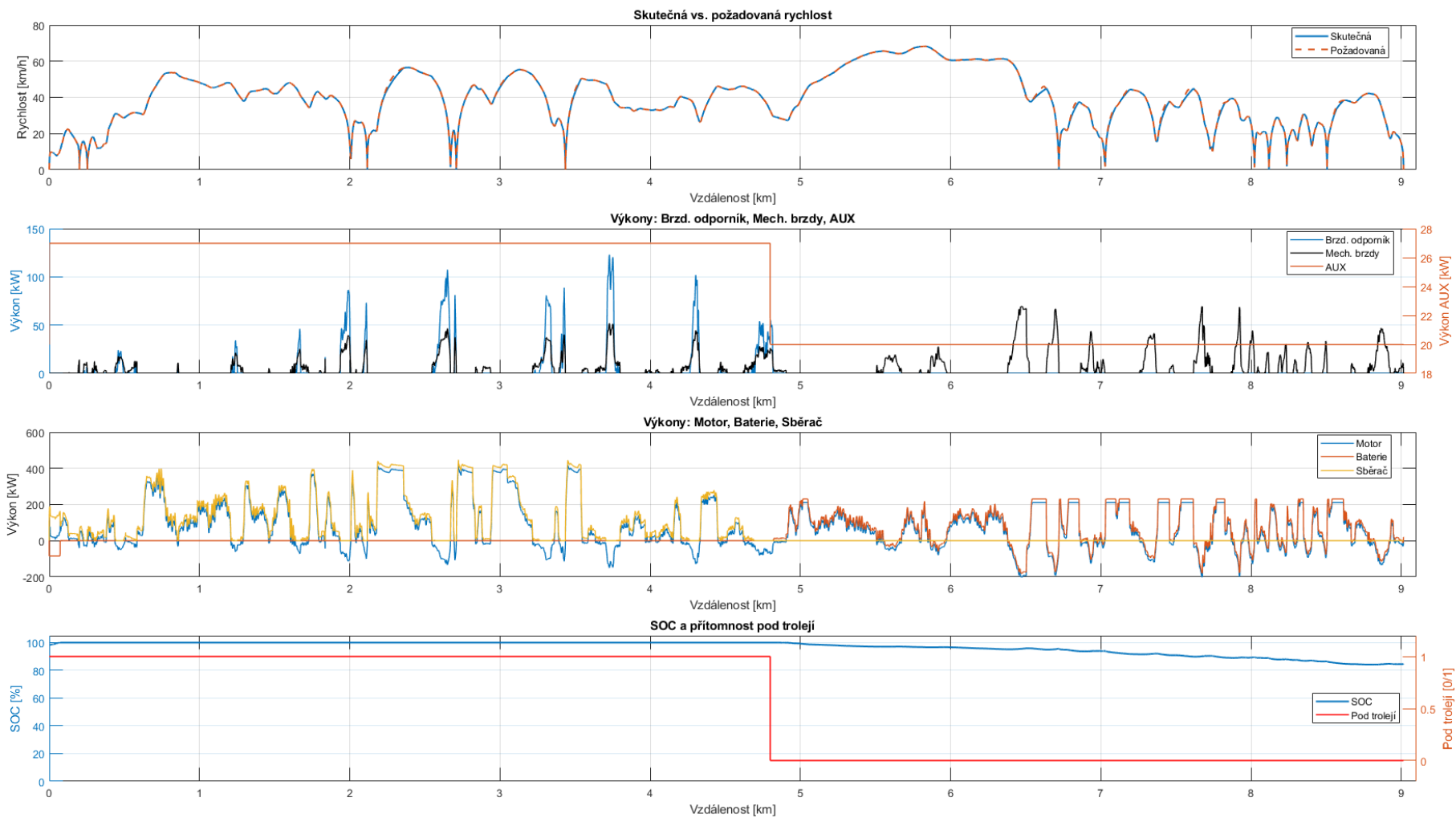
Příloha B - Vývojový diagram simulačního režimu Dynamický, část 1.



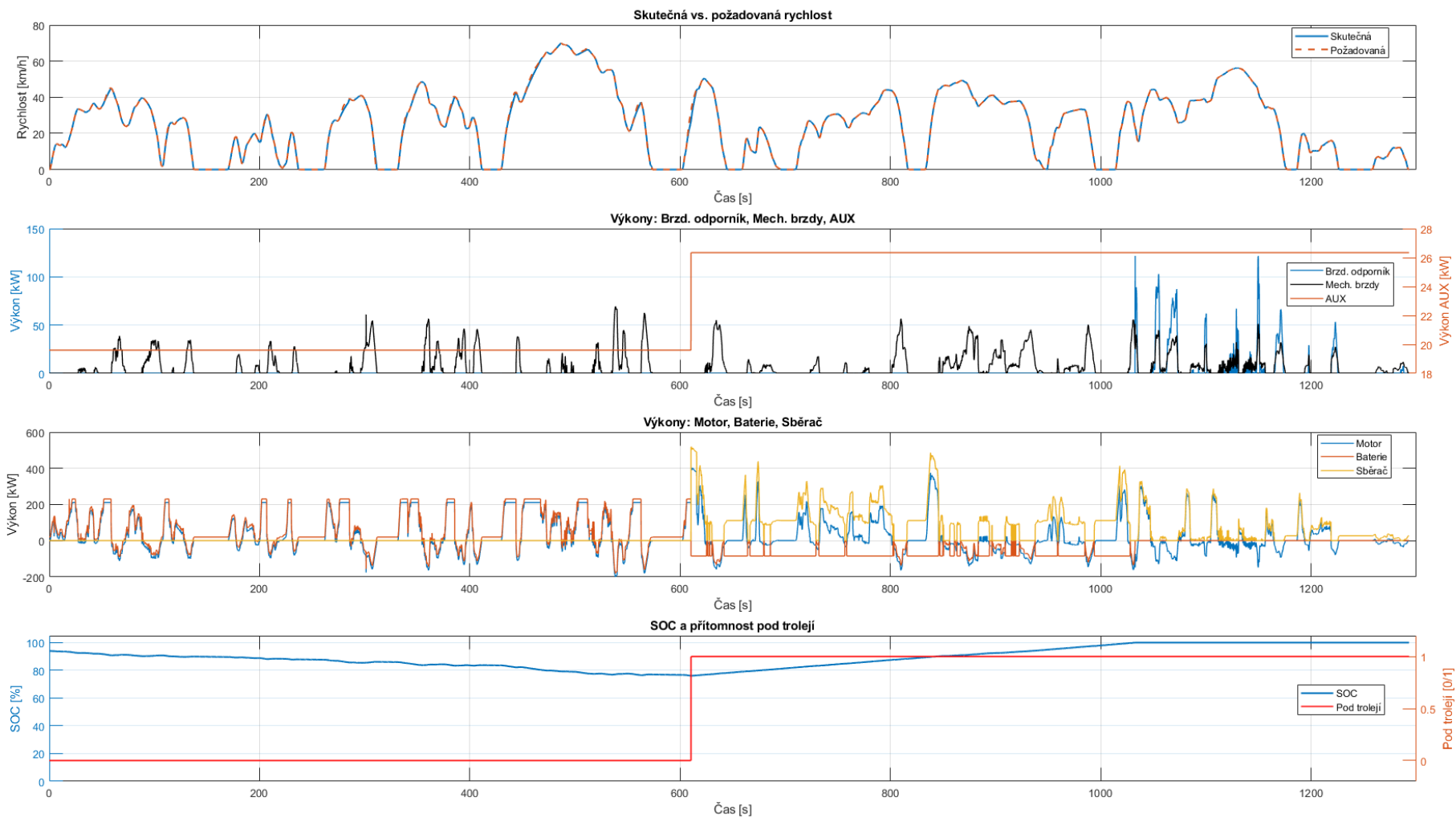
Příloha C - Vývojový diagram simulačního režimu Dynamický, část 2.



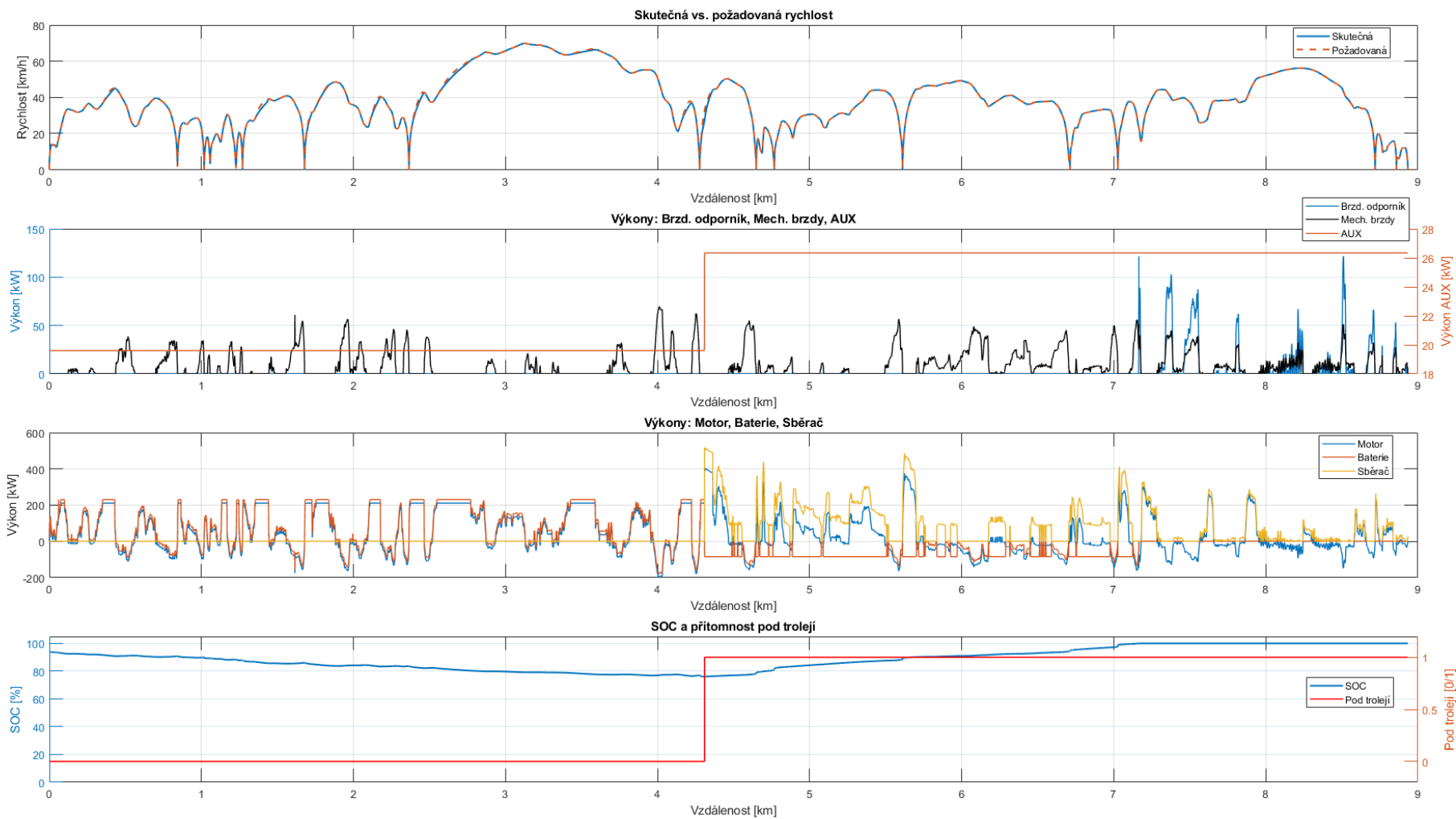
Příloha D - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči času simulace při jízdě ve směru Nádraží Veveřslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 %, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



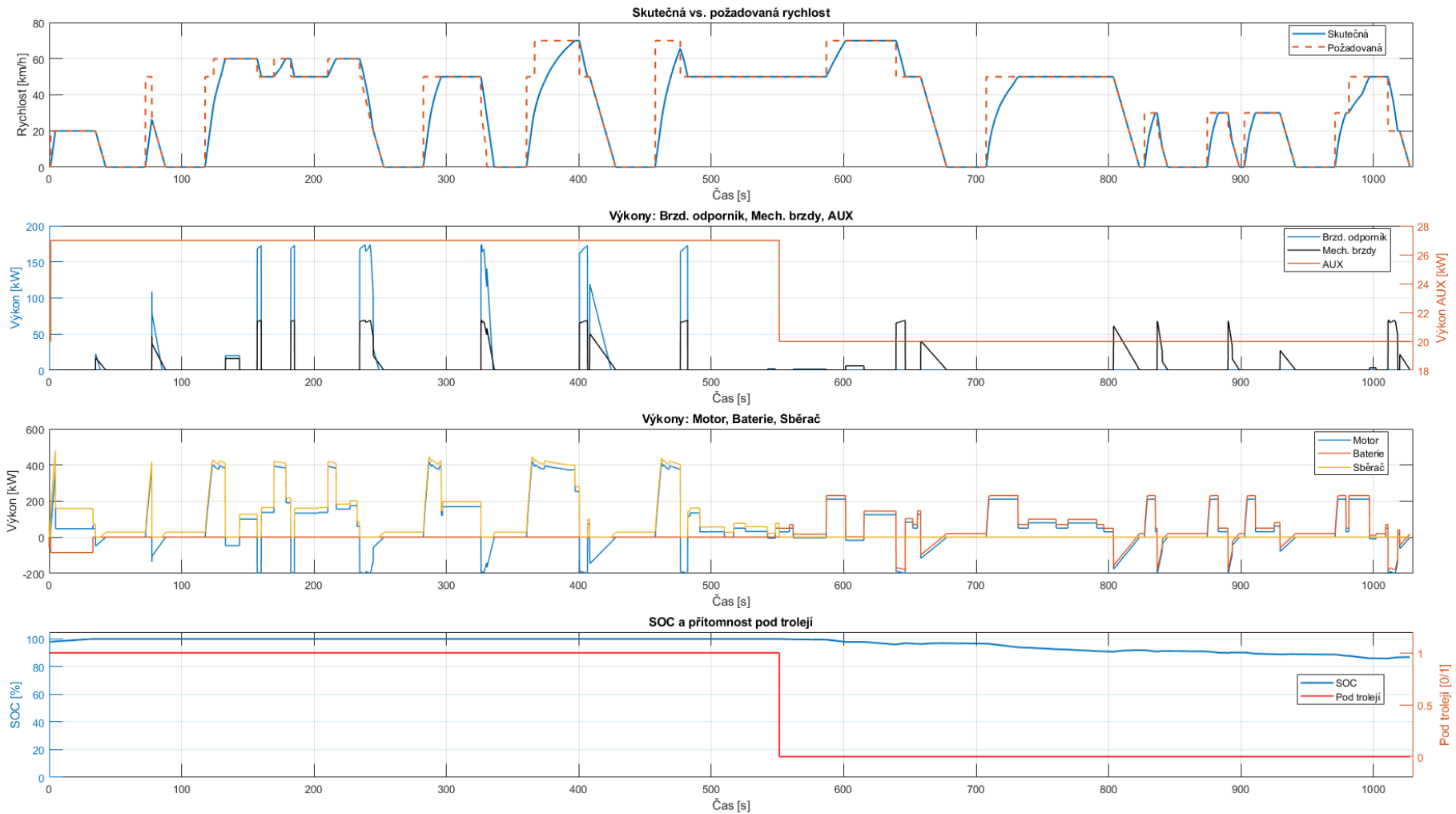
Příloha E - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Nádraží Veleslavin -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 %, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



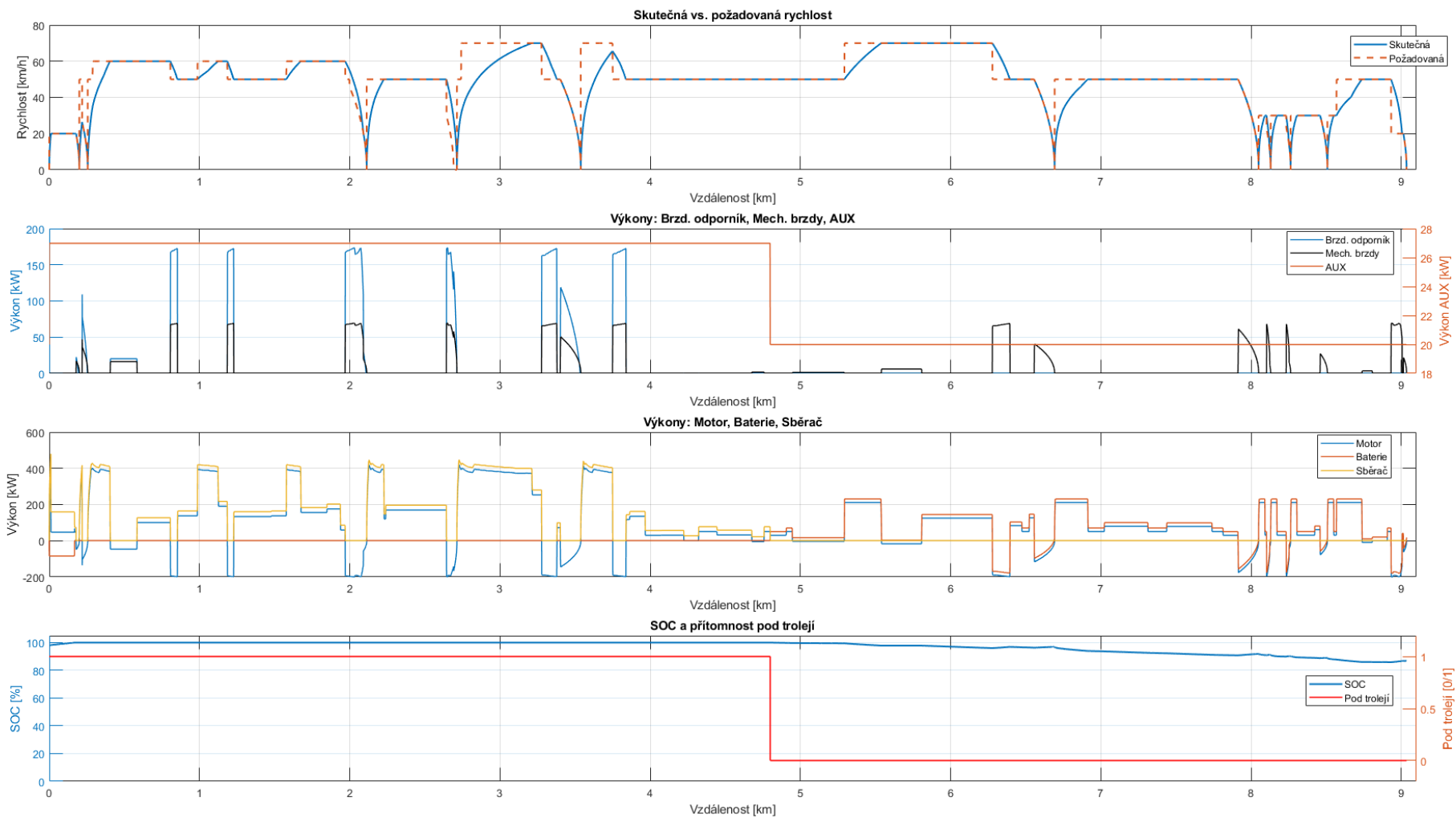
Příloha F - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči času simulace při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veveslavín, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 %, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



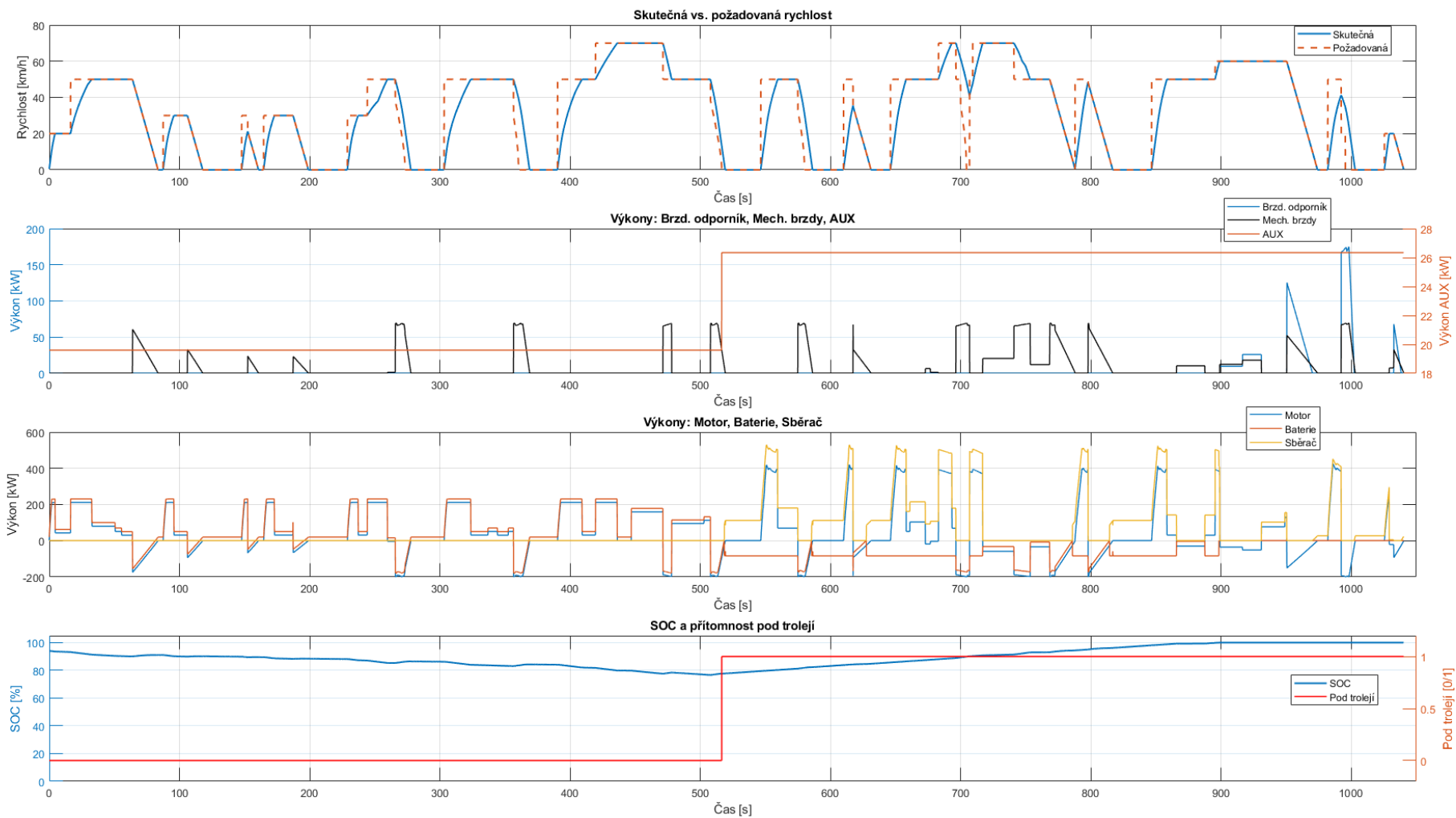
Príloha G - Průběhy hodnot simulace režimu Profil vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavin, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 %, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



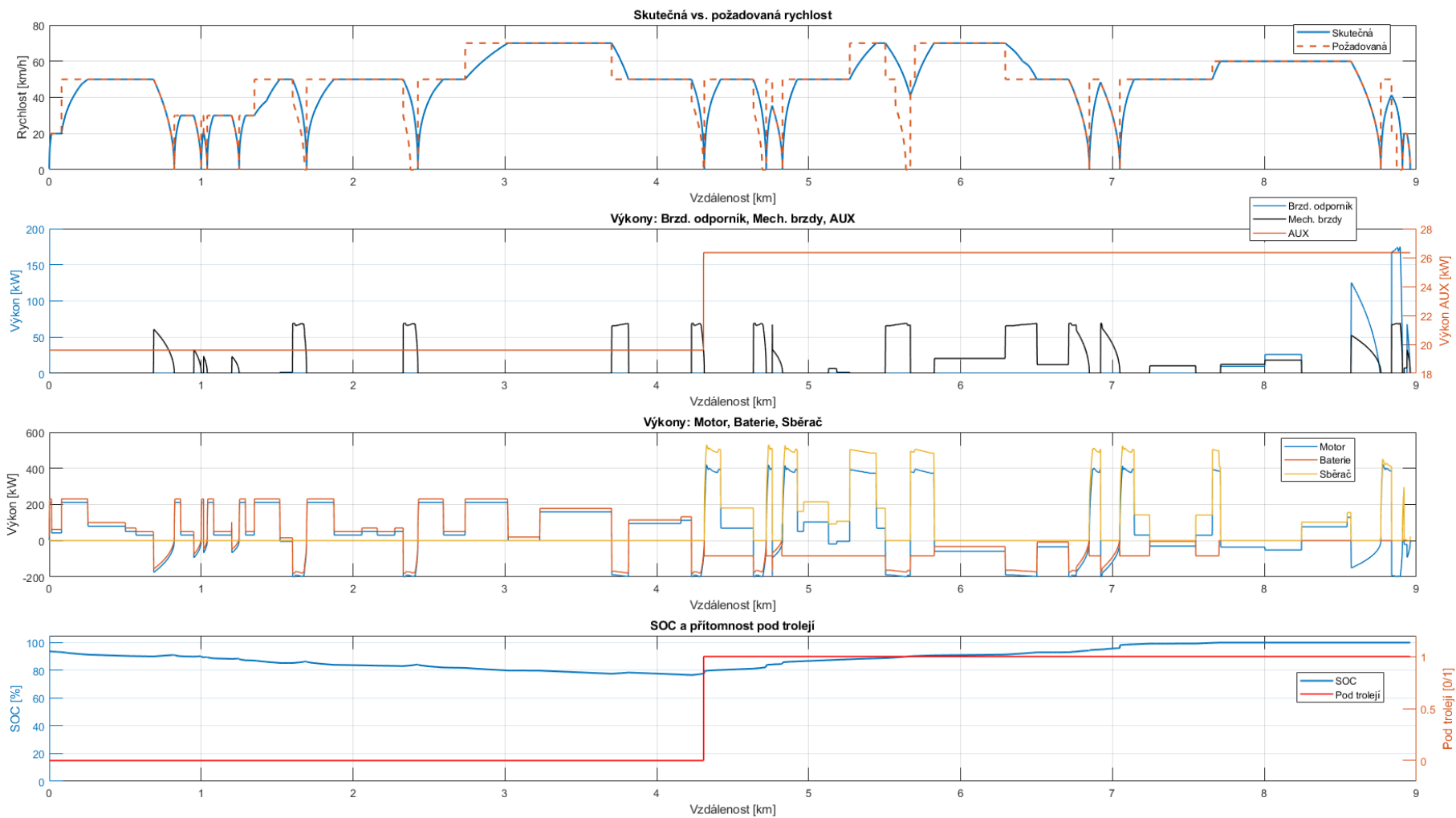
Příloha H - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči času simulace při jízdě ve směru Nádraží Veveslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 %, Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



Příloha I - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Nádraží Veveslavín -> Letiště, Průměrná teplota 3,54 °C, Počáteční SoC = 98 % , Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



Příloha J - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči času simulace při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veveslavín, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 %, Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]



Příloha K - Průběhy hodnot simulace režimu Dynamický vůči ujeté vzdálenosti při jízdě ve směru Letiště -> Nádraží Veleslavin, Průměrná teplota 3,79 °C, Počáteční SoC = 94 %, Simulační krok 0,1 s, [Podrobnější popis veličin zobrazených v grafech str. 92]