

**KATEDRA ELEKTRICKÝCH  
POHONŮ A TRAKCE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
ELEKTRICKÉ MOTOROVÉ  
JEDNOTKY S ALTERNATIVNÍM  
NAPÁJENÍM PRO REGIONÁLNÍ  
DOPRAVU**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**KVĚTEN 2024**

**HEDVIKA  
CHLUMSKÁ**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chlumská** Jméno: **Hedvika** Osobní číslo: **491920**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektrické pohony**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Elektrické motorové jednotky s alternativním napájením pro regionální dopravu**

Název diplomové práce anglicky:

**Electric Train Unit with Alternative Supply for Local Transport**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši možných řešení bezemisních motorových jednotek
- 2) Definujte obecné požadavky na základní strukturu trakčních obvodů
- 3) Porovnejte řešení EMU, BEMU, HEMU s ohledem na koncepci trakčních komponent
- 4) Vytvořte simulační modely jednotlivých motorových jednotek a ověřte funkčnost modelů na konkrétních příkladech provozu

Seznam doporučené literatury:

- [1] G. Abad, Power electronics and electric drives for traction applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2017.
- [2] R. Zhang, Z. Yin, J. Liu and S. Yu, "Low Carrier Wave Ratio Modulation Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Metro Traction System: A Comparative Study," in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 7, no. 1, pp. 1-16, March 2022.
- [3] A. F. Abouzeid, J. M. Guerrero, A. Endema no, I. Muniategui, D. Ortega, I. Larrazabal, et al., "Control strategies for induction motors in railway traction applications", Energies, vol. 13, no. 3, pp. 700, Feb.
- [4] DANZER, Jiří. Elektrická trakce I. - V. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-633-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky



## PODĚKOVÁNÍ

---

Chtěla bych zde poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Janu Bauerovi Ph.D. a firmě SIEMENS Mobility, za odborné konzultace a podporu v průběhu tvorby této práce.

## PROHLÁŠENÍ

---

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23. května 2024

.....

## ABSTRAKT

---

Tato práce pojednává o porovnání jednotlivých alternativních zdrojích napájení pro vlakové jednotky. Cílem práce je určit energeticky nejvhodnější zdroj napájení pro tratě s krátkým dojezdem mimo elektrifikovanou síť. Práce obsahuje stručnou teorii o elektrické trakci potřebnou k návržení trakčních konceptů jednotlivých vlakových jednotek a k vytvoření modelů pro simulaci v programu Matlab SIMULINK.

**Klíčová slova:** ČVUT FEL, katedra elektrických pohonů a trakce, elektrická trakce, EMU, BEMU, HEMU

## ABSTRACT

---

This thesis discusses the comparison of different alternative power supplies for train units. The aim of this work is to determine the most energetically suitable power source for short distance lines outside the electrified network. The thesis includes a brief theory on electric traction that is needed to design traction concepts for each train unit and to create models for simulation in the Matlab program SIMULINK.

**Keywords:** CTU FEE, Department of Electric Drives and Traction, final thesis, electric traction, EMU, BEMU, HEMU

# OBSAH

---

<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>KAPITOLA 1: ZÁKLADY ELEKTRICKÉ TRAKCE</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1 ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÉ TRAKCE</b> .....	<b>2</b>
1.1.1 Podle trakční napájecí sítě.....	2
1.1.1.1 DC síť.....	2
1.1.1.2 AC síť.....	2
1.1.2 Podle účelu použití trakčních vozidel .....	3
1.1.2.1 Vozidla pro přepravu cestujících.....	3
1.1.2.2 Vozidla pro nákladní dopravu .....	4
<b>1.2 ZÁKLADNÍ MECHANIKA TRAKČNÍCH VOZIDEL</b> .....	<b>4</b>
1.2.1 Odporové síly vozidla .....	4
1.2.2 Adheze.....	5
<b>1.3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY VOZIDEL</b> .....	<b>5</b>
1.3.1 Trakční charakteristika.....	5
1.3.2 Brzdová charakteristika .....	6
<b>KAPITOLA 2: REGIONÁLNÍ JEDNOTKA</b> .....	<b>7</b>
<b>KAPITOLA 3: ZÁKLADNÍ STRUKTURA TRAKČNÍCH OBVODŮ PRO REGIONÁLNÍ JEDNOTKY</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1 SBĚRAČ</b> .....	<b>8</b>
<b>3.2 MĚŘICÍ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ A PROUDU</b> .....	<b>8</b>
<b>3.3 HLAVNÍ VYPÍNAČ</b> .....	<b>9</b>
<b>3.4 HLAVNÍ TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>9</b>
<b>3.5 POMOCNÝ NABÍJECÍ OBVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>3.6 ČTYŘKVADRANTOVÝ MĚNIČ</b> .....	<b>10</b>
3.6.1 Řízení 4QC .....	10
3.6.2 Vyšší harmonické na střídavé straně měniče .....	11
3.6.3 Střídavá složka proudu na stejnosměrné straně měniče .....	11
<b>3.7 BRZDOVÝ CHOPPER</b> .....	<b>12</b>
<b>3.8 MĚNIČ PRO POMOCNÉ SYSTÉMY VLAKU</b> .....	<b>12</b>
<b>3.9 NAPĚŤOVÝ STŘÍDAČ</b> .....	<b>12</b>
<b>3.10 ASYNCHRONNÍ MOTORY</b> .....	<b>13</b>
3.10.1 Trakční charakteristika ASM.....	13
3.10.2 Brzdění ASM.....	14
3.10.2.1 Druhy brzdění.....	14
<b>KAPITOLA 4: REGIONÁLNÍ TRAKČNÍ JEDNOTKY S ALTERNATIVNÍM NAPÁJENÍM.</b> <b>15</b>	
<b>4.1 EMU – „ELECTRIC MULTIPLE UNIT“</b> .....	<b>15</b>
4.1.1 Budoucí trendy pro EMU.....	15
4.1.2 Trakční koncept EMU regionální jednotky .....	15
<b>4.2 BEMU – „BATTERY ELECTRIC MULTIPLE UNIT“</b> .....	<b>18</b>
4.2.1 Budoucí trendy pro BEMU .....	18
4.2.2 Trakční koncept BEMU regionální jednotky .....	18
<b>4.3 HEMU</b> .....	<b>21</b>
4.3.1 Trakční koncept HEMU regionální jednotky .....	21
<b>KAPITOLA 5: SIMULACE REGIONÁLNÍCH JEDNOTEK</b> .....	<b>23</b>

<b>5.1</b>	<b>PARAMETRY REGIONÁLNÍ JEDNOTKY .....</b>	<b>23</b>
<b>5.2</b>	<b>TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKA .....</b>	<b>24</b>
<b>5.3</b>	<b>SIMULOVANÁ TRATĚ.....</b>	<b>25</b>
5.3.1	Data profilu trati.....	25
<b>5.4</b>	<b>SIMULACE EMU JEDNOTKY.....</b>	<b>29</b>
5.4.1	Model EMU v SIMULINKu.....	29
5.4.1.1	Transformátory.....	29
5.4.1.2	Čtyřkvadrantový měnič.....	30
5.4.1.3	Stejnosměrný meziobvod a pomocné systémy.....	30
5.4.1.4	Asynchronní motor.....	31
5.4.1.5	Mechanický model.....	32
5.4.1.6	CONTROL.....	32
5.4.2	Důležité výsledné průběhy na tratích.....	33
5.4.2.1	Trat' Plzeň – Pňovany.....	33
5.4.2.2	Trat' Pňovany – Plzeň.....	36
5.4.3	Vyhodnocení průběhů.....	38
<b>5.5</b>	<b>SIMULACE BEMU JEDNOTKY .....</b>	<b>39</b>
5.5.1	Model BEMU v SIMULINKu.....	39
5.5.1.1	DC/DC měnič.....	40
5.5.1.2	Trakční baterie .....	42
5.5.2	Důležité výsledné průběhy na tratích BEMU.....	43
5.5.2.1	Trat' Plzeň – Bezručice.....	43
5.5.2.2	Trat' Bezručice – Plzeň.....	45
5.5.3	Vyhodnocení průběhů BEMU.....	48
<b>5.6</b>	<b>SIMULACE HEMU JEDNOTKY.....</b>	<b>50</b>
5.6.1	Model HEMU v SIMULINKu.....	50
5.6.1.1	Palivový článek (FC).....	50
5.6.1.2	Trakční baterie .....	51
5.6.1.3	Výpočet spotřeby vodíku a energie .....	51
5.6.2	Důležité výsledné průběhy na tratích HEMU .....	52
5.6.2.1	Trat' Plzeň – Bezručice.....	52
5.6.2.2	Trat' Bezručice – Plzeň.....	54
5.6.3	Vyhodnocení průběhů HEMU .....	56
 <b>KAPITOLA 6: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ</b>		
<b>PRO JEDNOTLIVÉ TYPY NAPÁJENÍ .....</b>		
		<b>57</b>
<b>6.1</b>	<b>POROVNÁNÍ EMU A BEMU JEDNOTKY .....</b>	<b>57</b>
<b>6.2</b>	<b>POROVNÁNÍ BEMU A HEMU JEDNOTKY .....</b>	<b>57</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>		<b>58</b>
<b>LITERATURA.....</b>		<b>59</b>
 <b>PŘÍLOHA A: PŘÍKLAD SEZNAMU SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		
		<b>61</b>
<b>A.1</b>	<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>61</b>
<b>A.2</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>61</b>
 <b>PŘÍLOHA B: MODEL V SIMULINKU .....</b>		
		<b>63</b>
<b>B.3</b>	<b>EMU.....</b>	<b>63</b>
<b>B.4</b>	<b>BEMU.....</b>	<b>64</b>



<b>B.5 HEMU .....</b>	<b>65</b>
<b>PŘÍLOHA C: PRŮBĚHY VELIČIN .....</b>	<b>66</b>
<b>C.6 EMU.....</b>	<b>66</b>
<b>C.7 BEMU.....</b>	<b>67</b>
<b>C.8 HEMU.....</b>	<b>68</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

---

Obr. 1-1 Rozdělení trakčních sítí v Evropě [3] .....	2
Obr. 1-2 Regionální jednotka (vlevo nahoře) [4], vysokorychlostní jednotka (vpravo nahoře) [5], pří městská jednotka (dole) [6] .....	3
Obr. 1-3 Adheze (tečná síla je síla pohanějí cí soupravu) [2] .....	5
Obr. 1-4 Příklad typické trakční charakteristiky s křivkou adheze [2] .....	5
Obr. 1-5 Příklad typických brzdových charakteristik. Do neregulovaného odpor níku (vlevo), s řízeným odporem (vpravo) [2] .....	6
Obr. 2-1 Regionální jednotka SIEMENS Mireo [9] .....	7
Obr. 3-1 Proudový sběrač (polopantograf) [10] .....	8
Obr. 3-2 Měřící transformátor napětí (vlevo) [11] a proudu (vpravo) [12] .....	8
Obr. 3-3 Vakuový vypínač Secheron [13] .....	9
Obr. 3-4 Trakční transformátor SIEMENS 1,8 MVA [15] .....	9
Obr. 3-5 Schéma zapojení 4QC [16] .....	10
Obr. 3-6 Náhradní schéma a fázorový diagram 4QC [14] .....	11
Obr. 3-7 Různé pomocné vlakové systémy [17] .....	12
Obr. 3-8 Napěťový střídač Mitsubishi [18] .....	13
Obr. 3-9 Trakční charakteristika [19] .....	13
Obr. 3-10 Trakční asynchronní motor Siemens [20] .....	14
Obr. 4-1 Projekt Taxirail [22] .....	15
Obr. 4-2 Trakční koncept pro EMU .....	17
Obr. 4-3 Siemens Mireo Plus B [24] .....	18
Obr. 4-4 Trakční koncept pro BEMU .....	20
Obr. 4-5 Siemens Mireo Plus H [25] .....	21
Obr. 4-6 Trakční koncept pro HEMU .....	22
Obr. 5-1 Trakční charakteristika vlaku .....	24
Obr. 5-2 Mapa tratí Plzeňsko [26] .....	25
Obr. 5-3 Data ze stránek Zelpage.cz [27] .....	26
Obr. 5-4 Profil trati Plzeň – Pňovany - Bezdružice .....	27
Obr. 5-5 Profil trati Bezdružice – Pňovany - Plzeň .....	28
Obr. 5-6 Schematický koncept modelu v SIMULINKu (EMU) .....	29
Obr. 5-7 Blok transformátoru .....	29
Obr. 5-8 Blok čtyřkvadrantového měniče .....	30
Obr. 5-9 Regulace napětí na meziobvodu .....	30
Obr. 5-10 Blok pomocných systémů .....	31
Obr. 5-11 Blok pomocných systémů .....	31
Obr. 5-12 Blok asynchronního motoru .....	31
Obr. 5-13 Blok mechanického modelu a modelování sklonu .....	32
Obr. 5-14 Blok CONTROL .....	32

Obr. 5-15 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě .....	33
Obr. 5-16 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (EMU – PLZPŇO) .....	34
Obr. 5-17 Průběhy proudu tekoucího z čtyřkvadrantového měniče do meziobvodu (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PLZPŇO) .....	35
Obr. 5-18 Průběh spotřebované energie ze sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PLZPŇO) .....	35
Obr. 5-19 Průběh rekuperované energie do sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PLZPŇO) .....	36
Obr. 5-20 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (EMU – PŇOPLZ) .....	36
Obr. 5-21 Průběhy proudu tekoucího z čtyřkvadrantového měniče do meziobvodu (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PŇOPLZ) .....	37
Obr. 5-22 Průběh spotřebované energie ze sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PŇOPLZ) .....	37
Obr. 5-23 Průběh rekuperované energie do sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PŇOPLZ) .....	38
Obr. 5-24 Schematický koncept modelu v SIMULINKu (BEMU) .....	39
Obr. 5-25 Blok DC/DC měniče .....	40
Obr. 5-26 Regulace napětí na meziobvodu BEMU .....	41
Obr. 5-27 Průběhy proudů napájejících meziobvod BEMU .....	41
Obr. 5-28 Blok trakční baterie .....	42
Obr. 5-29 Nabíjecí a vybíjecí charakteristika [30] .....	42
Obr. 5-30 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (BEMU – PLZ-BEZ) .....	43
Obr. 5-31 Průběhy spotřeby v letních měsících (BEMU – PLZBEZ) .....	44
Obr. 5-32 Průběhy rekuperované energie v letních měsících (BEMU – PLZBEZ) .....	44
Obr. 5-33 Průběh SoC trakční baterie (zima – modrá x léto – červená) (BEMU – PLZBEZ) .....	45
Obr. 5-34 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (BEMU – BEZPLZ) .....	46
Obr. 5-35 Průběhy spotřeby v letních měsících (BEMU – BEZPLZ) .....	47
Obr. 5-36 Průběhy rekuperované energie v letních měsících (BEMU – BEZPLZ) .....	47
Obr. 5-37 Průběh SoC trakční baterie (zima – modrá x léto – červená) (BEMU – BEZPLZ) .....	48
Obr. 5-38 Schematický koncept modelu v SIMULINKu (HEMU) .....	50
Obr. 5-39 Blok palivového článku .....	51
Obr. 5-40 Průběh regulace výkonu palivového článku .....	51
Obr. 5-41 Průběh celkové rekuperované energie do baterie (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – PLZBEZ) .....	52
Obr. 5-42 Průběh celkové spotřebované energie z palivového článku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – PLZBEZ) .....	53
Obr. 5-43 Průběh energie potřebné k výrobě vodíku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – PLZBEZ) .....	54
Obr. 5-44 Průběh celkové rekuperované energie do baterie (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – BEZPLZ) .....	54
Obr. 5-45 Průběh celkové spotřebované energie z palivového článku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – BEZPLZ) .....	55
Obr. 5-46 Průběh energie potřebné k výrobě vodíku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – BEZPLZ) .....	55
Obr. B-1 Celkový model EMU v SIMULINKu .....	63

Obr. B-2 Celkový model BEMU v SIMULINKu.....	64
Obr. B-3 Celkový model HEMU v SIMULINKu .....	65
Obr. C-1 Průběh odebíraného výkonu ze sítě EMU (PLZ-PŇO, léto) .....	66
Obr. C-2 Průběh odebíraného výkonu ze sítě EMU (PŇO-PLZ, léto) .....	66
Obr. C-3 Průběh odebíraného výkonu ze sítě a z baterie BEMU (PLZ-BEZ, léto) .....	67
Obr. C-4 Průběh odebíraného výkonu ze sítě a z baterie BEMU (BEZ-PLZ, léto) .....	67
Obr. C-5 Průběh odebíraného výkonu z DC/DC měniče do meziobvodu HEMU (PLZ-BEZ, léto) .....	68
Obr. C-6 Průběh odebíraného výkonu z DC/DC měniče do meziobvodu HEMU (BEZ-PLZ, léto) .....	68

## SEZNAM TABULEK

---

Tabulka 1 – Parametry regionální jednotky .....	23
Tabulka 2 – Důležité výsledné hodnoty průběhů EMU jednotek .....	38
Tabulka 3 – Výsledné hodnoty spotřebované energie EMU jednotek .....	38
Tabulka 4 – Hodnoty pro trať PLZ – PŇO (BEMU).....	48
Tabulka 5 – Výsledné hodnoty spotřebované energie BEMU jednotek .....	49
Tabulka 6 – Stavby nabití baterie na průběhu trati BEMU .....	49
Tabulka 7 – Dojezd vlaku s menší baterií (kapacita baterie 200 kWh).....	49
Tabulka 8 – Údaje pro výrobu energie z vodíku .....	52
Tabulka 9 – Výsledné hodnoty spotřebované energie HEMU jednotek .....	56
Tabulka 10 – Stavby nabití baterie na průběhu trati HEMU .....	56
Tabulka 11 – Porovnání výsledků EMU a BEMU jednotek na trati Plzeň – Pňovany .....	57
Tabulka 12 – Porovnání výsledků BEMU a HEMU jednotek na trati Plzeň – Bezručice.....	57

## ÚVOD

V dnešní době se prosazuje trend redukce emisí CO<sub>2</sub>. Proto v oblasti železniční dopravy vyvstává otázka, jakými zdroji energie lze nahradit vlaky poháněné fosilními palivy. Moderní technologie nám v současnosti umožňují použít jako zdroj energie lithiovou baterii nebo stlačený vodík.

Tato práce se zabývá výběrem vhodné náhrady dieselových regionálních vlaků s krátkým dojezdem. Variantou pro krátké úseky mimo elektrifikovanou trať jsou bateriové jednotky BEMU nebo jednotky vodíkové HEMU. Jednotka BEMU je porovnávána i s jednotkou napájenou čistě z trakčního vedení, za účelem zjištění, zda se vyplatí provoz těchto vlaků.

Nejprve je třeba vytvořit trakční koncept pro jednotlivé vlakové jednotky. Ten následně poslouží jako vodítko pro vytvoření jednotlivých simulačních modelů v programu Matlab SIMULINK. Vytvořené modely se poté odsimulují na vybrané trati, která kombinuje prvky elektrifikované trati a trati bez trakčního vedení. Tato trať má daný rychlostní profil podle dat SŽDC a vyskytuje se na ni několik zastávek. Dalším parametrem trati je její proměnlivý sklon.

Na základě těchto simulací je možno vyhodnotit vhodnost jednotlivých zdrojů napájení pro elektrické jednotky v místech, kde je potřeba spojit oblasti nacházející se do 40 km od elektrifikované části trati, a tím nahradit dieselové jednotky, které jsou zde provozovány, bez potřeby výstavby trakčního vedení.

V Praze dne 18.05.2024

Hedvika Chlumská

## KAPITOLA 1: ZÁKLADY ELEKTRICKÉ TRAKCE

Pojem elektrická trakce se vztahuje k vozidlům pohybujícím se po kolejích, které mají vlastní pohon. V dnešní době se rozlišuje několik druhů železnic, které jsou přiblíženy v kapitole 1.1.

### 1.1 Rozdělení elektrické trakce

#### 1.1.1 Podle trakční napájecí sítě

V Evropě se vyskytuje hned několik možností, jak napájet trakční vozidla. Nejzákladnější rozdělení je podle proudu. Ten může být buď stejnosměrný, nebo střídavý.

##### 1.1.1.1 DC síť

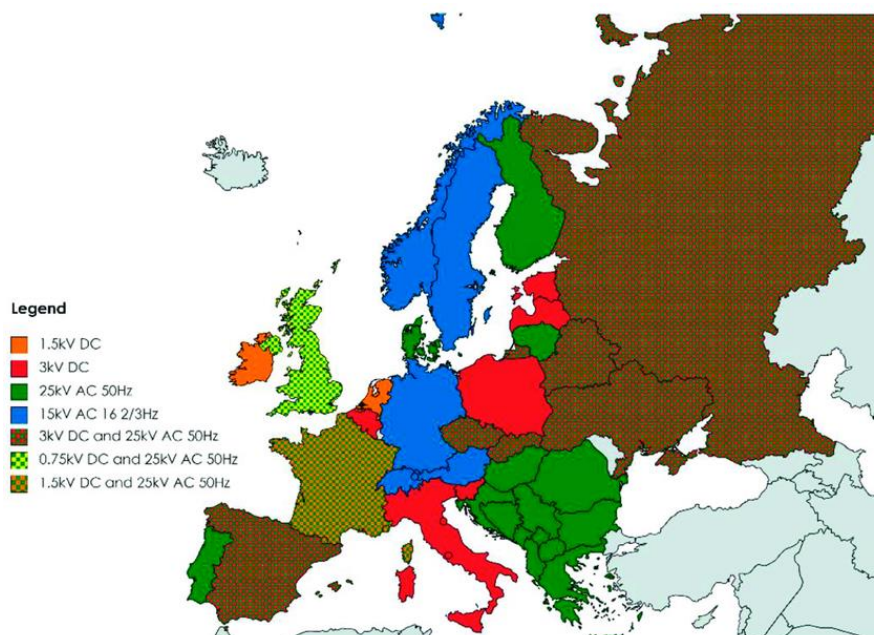
První typ napájení je ze stejnosměrné sítě, která je historicky nejstarší. Tato varianta se nejčastěji používá pro tramvajové a podzemní systémy dopravy. I přes jejich podstatnou nevýhodu, jež je výkonová limitace, se ale tyto systémy používají nadále [1]. DC sítě jsou dimenzované na různé napěťové úrovně, a to 600 V (pro MHD), 1500 V a 3000 V. Zdrojem napětí jsou měničny napájené (pro případ ČR) z distribuční třífázové sítě přes usměrňovače. Napětí na trolejích může kolísat -30 až +20 % v závislosti na zátěži, délce napájeného úseku a dalších faktorech. DC síť se v ČR používá kromě v MHD také na severu ČR, přesněji 3 kV [2].

##### 1.1.1.2 AC síť

Druhým možným způsobem napájení je střídavá síť. Střídavá napájecí síť se v Evropě používá buď jednofázová s jmenovitým napětím 15 kV a kmitočtem 16 2/3 Hz. Tato síť se používá v např. v Německu, ve Švédsku nebo ve Švýcarsku. Nebo jednofázová síť s jmenovitým napětím 25 kV a kmitočtem 50 Hz, který se používá na jihu ČR, nebo například ve Francii [1]. Hlavní výhodou střídavé napájecí sítě je možnost přenosu většího výkonu s menšími proudy a ztrátami. V této variantě je ale nutnost mít na vozidle transformátor na rozdíl od DC sítě [2].

V ČR se opět k napájení trakčních vedení používají distribuční sítě. V zahraničí, například v Německu, se pro napájení trakčních vedení používají samostatné napájecí sítě.

Tato práce je dále zaměřena na napájení z 25 kV/ 50Hz sítě.



Obr. 1-1 Rozdělení trakčních sítí v Evropě [3]

## 1.1.2 Podle účelu použití trakčních vozidel

V rámci základního rozdělení trakčních vozidel podle použití se rozlišují dva druhy, a to sice vozidla pro přepravu cestujících a vozidla pro nákladní dopravu.

### 1.1.2.1 Vozidla pro přepravu cestujících

Kromě vozidel MHD (trolejbusů, tramvají a meter) sem patří regionální jednotky, velkokapacitní příměstské jednotky a vysokorychlostní doprava. Tyto jednotlivé kategorie se liší hlavně v požadavcích na jejich vlastnosti.

Regionální jednotky se používají pro dopravu na kratší vzdálenosti v rámci jednoho regionu. Tyto tratě mají po trase vysoký počet stanic a dosahují nejnižších rychlostí. Vlaky jsou většinou jednopodlažní a skládají se z kratších souprav (2-3 vozy). Požadavkem je, aby tyto vlaky měly jednoduché a levné řešení celé koncepce. Neklade se důraz na vysokou redundanci. Vlaky tedy mají většinou pouze jeden transformátor, jeden hlavní vypínač a jeden sběrač. To znamená, že v případě poruchy bohužel dojde k nepojízdnosti celé soupravy. Jejich výkon se pohybuje v řádech 1500–3000 kW. Těmito jednotkami se bude zabývat simulační část této práce.

Další kategorie tvoří velkokapacitní příměstské jednotky. Tyto jednotky často slouží k dopravě z příměstských oblastí do velkých měst. Proto je prvním požadavkem na tyto vlaky, aby, jak již z názvu plyne, měly vyšší kapacitu. To znamená, že bývají vícepodlažní a mají delší soupravy (5-6 vozů). Zde se již klade vyšší důraz na redundanci. Mají dva sběrače, dva transformátory a dva hlavní vypínače. Zde je také potřeba vyšší dynamiky, a tudíž vyššího výkonu jednotky. Ta se pohybuje okolo 2600–4000 kW.

Poslední kategorií jsou jednotky pro vysokorychlostní dopravu. Tyto vlaky slouží pro dopravu na delší vzdálenosti s jen několika zastávkami po cestě. Výhodou této dopravy je nízká energetická náročnost. Ta plyne z faktu, že největší potřeba energie je při rozjezdu. Jelikož tyto vlaky většinu času jen udržují rychlost, je spotřeba energie nízká. Nevýhodou je ale, že aerodynamický odpor roste s druhou mocninou rychlosti (jak plyne z rovnice (1-3)). Tudíž u vysokorychlostních jednotek je nutno se zabývat aerodynamikou a snížit tento odpor. Jinak by se musel aerodynamický odpor vyrovnávat velkým výkonem jednotky.



Obr. 1-2 Regionální jednotka (vlevo nahoře) [4], vysokorychlostní jednotka (vpravo nahoře) [5], příměstská jednotka (dole) [6]

### 1.1.2.2 Vozidla pro nákladní dopravu

Pro nákladní dopravu se používají lokomotivy, které za sebou táhnou náklad. V lokomotivě musí být soustředěný vysoký výkon pro rozjetí a zabrzdění vysokých hmotností. O těchto lokomotivách se ale v této práci nepojednává.

## 1.2 Základní mechanika trakčních vozidel

Prvním důležitým pojmem pro mechaniku trakčních vozidel jsou pohybové rovnice. Základní rovnicí bude 2. Newtonův zákon:

$$F = m \cdot a, \quad (1-1)$$

kde  $F$  bude v našem případě odpovídat síle, která vznikne odečtením odporových sil od tažné síly soupravy po obvodu kol [2].

### 1.2.1 Odporové síly vozidla

Obecně lze odporové síly definovat jako síly, které působí proti silám tažným. Jsou rozděleny do několika částí. Jsou to jízdní odpory, odpory při stoupání, odpory při průjezdu obloukem a odpory zrychlením [1].

Odpory budou vyjadřovány pomocí měrných traťových odporů ( $p_0$ ), jež následně lze přepočítat na odporovou sílu:

$$F = \frac{p_0}{1000} \cdot g \cdot m, \quad (1-2)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení a  $m$  hmotnost jednotky.

Měrný jízdní odpor je potom definován jako polynom ve tvaru:

$$p_0 = a + bv + cv^2, \quad (1-3)$$

kde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  jsou koeficienty vyjadřující suché tření, kapalinové tření a odpor vzduchu. Odpor vzduchu roste s druhou mocninou rychlosti. Proto je potřeba, aby soupravy pro vysoké rychlosti byly co nejvíce aerodynamické.

Měrný odpor pro stoupání jde vyjádřit pomocí gradientu udávaném v promilích a je značen jako  $s$ .

$$s = \tan \alpha \cdot 1000 \quad (1-4)$$

Dalším odporem je odpor při průjezdu obloukem. Ten lze přepočítat při znalosti poloměru oblouku  $R$  pomocí vztahu (1-5) na měrný traťový odpor (platné pro rozchod 1435 mm). [2]

$$p_R = \frac{650}{R - 55} \quad (1-5)$$

Tyto odpory souvisely s pohybem konstantní rychlostí. Posledním odporem je odpor zrychlením.

$$p_{acc} = \frac{a}{g} \xi, \quad (1-6)$$

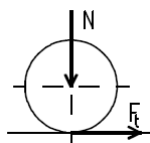
kde  $a$  je zrychlení vlaku,  $g$  je tíhové zrychlení a  $\xi$  odpovídá toleranci pro rotující hmotu. Hodnota  $\xi$  pro výpočty je stanovena na 1,15. Typická hodnota zrychlení pro regionální vlakové jednotky je 0,8 – 1,2 m/s<sup>2</sup> [1].

Aby se překonali všechny tyto odpory, musí se dodat odpovídající síla. Jednotky vlaků jsou dimenzovány tak, aby jmenovitá hodnota výkonu pohonu odpovídala odporové síle při rovnoměrném pohybu při jmenovité rychlosti vlaku  $v_1$ . Pro navýšení rychlosti se již výkon pohonu nenavýšuje, pouze se snižuje síla magnetického pole v motorech.



## 1.2.2 Adheze

Dalším důležitým pojmem pro trakci je adheze. Vyjadřuje schopnost přenášet tečné síly z kola na kolejnice, tedy adheze zabraňuje kolům, aby prokluzovaly [2].



Obr. 1-3 Adheze (tečná síla je síla pohanějí soupravu) [2]

Adheze limituje maximální trakční výkon. Pro její popis slouží koeficient adheze.

$$\mu = \frac{F_{tmax}}{N}, \quad (1-7)$$

kde  $F_{tmax}$  je maximální tažná síla jednotky a  $N$  je tíha připadající na nápravu. Ve chvíli, kdy je tažná síla vyšší než:

$$F_t = N \cdot \mu \quad (1-8)$$

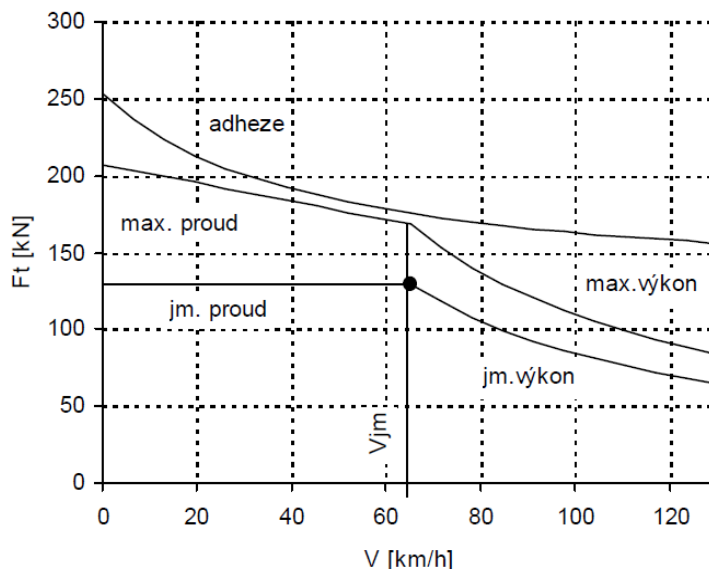
dochází ke skluzu. Pro koeficient adheze oceli s ocelí je při ideálních podmínkách  $\mu = 44 \%$  [7]. Koeficient adheze je nejvíce závislý na okolních podmínkách. S rostoucí vlhkostí koeficient adheze klesá. Pro zvýšení přenášené síly by se tedy musela zvýšit tíha na nápravu. Ta je ovšem také limitovaná maximální nosností nápravy.

## 1.3 Základní charakteristiky vozidel

Dvě hlavní charakteristiky vozidel jsou trakční a brzdová.

### 1.3.1 Trakční charakteristika

Trakční charakteristika udává závislost tažné síly na obvodu kol na rychlosti.



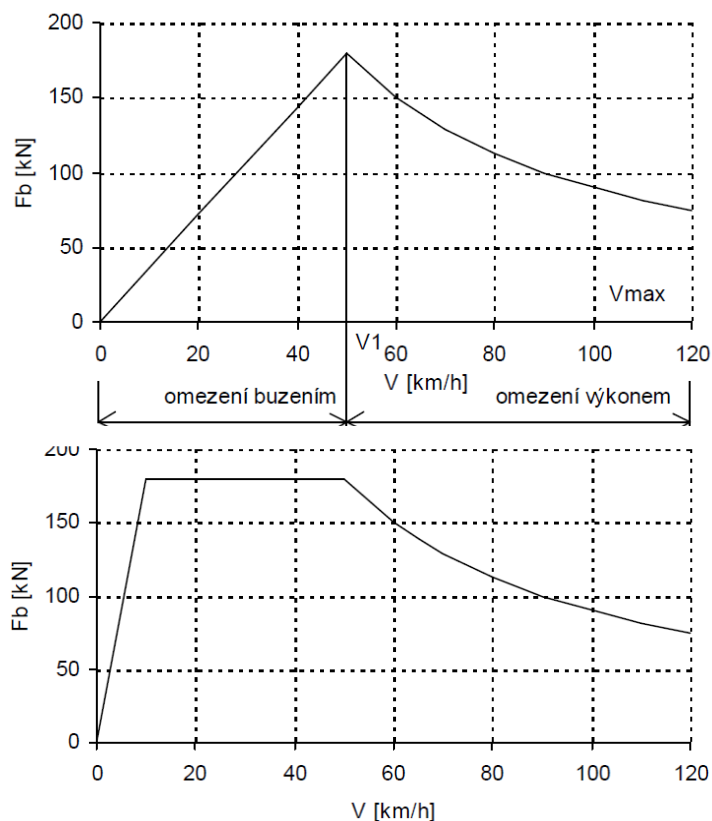
Obr. 1-4 Příklad typické trakční charakteristiky s křivkou adheze [2]

Na Obr. 1-4 je vyobrazen příklad trakční charakteristiky. Nejvyšší křivka určuje limitaci charakteristiky adheze. Kdyby se trakční charakteristika nacházela nad touto křivkou, docházelo by k prokluzování kol. Pod křivkou adheze se nachází křivka, která je omezena maximálním proudem a po překročení jmenovité rychlosti maximálním výkonem pohonu. Nejspodnější křivka vyobrazuje provoz při jmenovitém proudu a výkonu. Lze si všimnout, že křivka za jmenovitou

rychlostí klesá omezením výkonu. Aby se totiž dosáhlo těchto rychlostí nad jmenovitou rychlostí, musí se použít odbuzení. To znamená, že na motoru se zeslabí magnetické pole, a tedy jeho výsledná tažná síla se bude snižovat se zvyšující požadovanou rychlostí. Pro udržování vyšších rychlostí, ale tolik tažné síly není potřeba, a proto se tento princip dimenzování běžně používá. Křivka je pak na konci omezena maximální rychlostí vozidla, kterou ještě mechanické součásti pohonu povolí.

### 1.3.2 Brzdová charakteristika

Brzdové charakteristiky udávají závislost brzdné síly na rychlosti. Existuje několik typů brzdění. Do neregulovaného odporníku, s řízeným odporem nebo rekuperační brzda.



Obr. 1-5 Příklad typických brzdových charakteristik. Do neregulovaného odporníku (vlevo), s řízeným odporem (vpravo) [2]

Při nejvyšším brzdném výkonu u neregulovaného odporníku je nebezpečí proklouznutí kol. Proto se v praxi tento výkon omezuje. Při brzdění s řízeným odporem lze dosáhnout lepšího účinku brzdy.

Tato práce se zabývá brzdou rekuperační. Ta má tvar křivky obdobný křivce trakční, pouze s jinými omezeními [2].

U všech vlaků jsou nainstalovány i přídavné brzdy v případě výpadku možnosti použití rekuperačního brzdění. Brzdný výkon rekuperační brzdy zhruba odpovídá trakčnímu výkonu vlaku. Výkon z rekuperace se poté využívá primárně pro napájení pomocných systémů (APS), nebo se vrací zpět do trakčního vedení [8].

## KAPITOLA 2: REGIONÁLNÍ JEDNOTKA

Předchozí kapitola definuje obecné předpoklady pro simulaci trakčního vozidla. Tato kapitola se zaměřuje specificky na regionální jednotky (popsané v kapitole 1.1.2.1) a jejich požadavky. Tato práce se zabývá pouze elektrickou stránkou vlaku (napájecími obvody, pohonem).

V této práci je simulována regionální jednotka napájená z AC sítě 25 kV a 50 Hz. Má tedy jen jeden napájecí systém, a tím se výrazně sníží složitost trakčního obvodu. Regionální jednotky, by jak již bylo řečeno, měly být krátké, dvou až tří vozové a nízkopodlažní. Jelikož jsou vozidla nízkopodlažní, je zapotřebí umístit všechny části trakční výzbroje buď na střechu jednotky, nebo jak se dříve používalo, mezi kabinu řidiče a cestujících. Tím se však výrazně zmenší prostor pro využití k přepravě. V návrhu je použit krátký dvou vozový vlak s trakční výzbrojí na střeše, který má pouze jeden sběrač, a má tedy nízkou redundanci. Dále je potřeba dimenzovat výkon tak, aby měla jednotka vysokou dynamiku, to znamená, aby byla schopna rychlého rozjezdu a zabrzdění. To zvyšuje rychlost přepravy cestujících, a tím se snižuje časová náročnost celkové přepravy.



Obr. 2-1 Regionální jednotka SIEMENS Mireo [9]

Jednotka použitá pro simulaci v této práci má dva vozy. Na každém voze je jedna napájená náprava s dvěma asynchronními motory. Na jednu nápravu připadá jeden napěťový měnič, který řídí tento pohon.

## KAPITOLA 3: ZÁKLADNÍ STRUKTURA TRAKČNÍCH OBVODŮ PRO REGIONÁLNÍ JEDNOTKY

Pro fungování asynchronního motoru je třeba zdroj napájení. Mezi trolejí a motorem je však mnoho dalších elektrických součástí. Práce se zabývá regionálními jednotkami s asynchronním pohonem a AC napájecí sítí. Trakční obvody tedy odpovídají tomuto typu jednotky.

### 3.1 Sběrač

Při analýze jednotky směrem od troleje k trakčnímu pohonu, se jako první na vlaku nachází sběrač. Sběrač slouží k přenášení výkonu mezi napájecí sítí a samotným trakčním obvodem vozidla. Po Evropě je několik sběračových systémů, a proto je při návrhu vozidla třeba na to brát zřetel. Sběrače by se pak na šířku nemusely vejít do tunelů a tak podobně. Pod sběračem se nachází odpojovač a uzemňovač pro bezpečné odpojení vlaku od sítě. Nachází se zde i svodiče přepětí.



Obr. 3-1 Proudový sběrač (polopantograf) [10]

### 3.2 Měřicí transformátor napětí a proudu

Dalšími důležitými komponentami jsou měřicí transformátory napětí a proudu. Ty se vyskytují na vícero místech v trakčním obvodu vozidla. Hlavní měřicí transformátor napětí se vyskytuje mezi sběračem a hlavním vypínačem. Tento MTN se používá ke sledování napětí v síti, a tedy ochraně proti přepětí či podpětí.

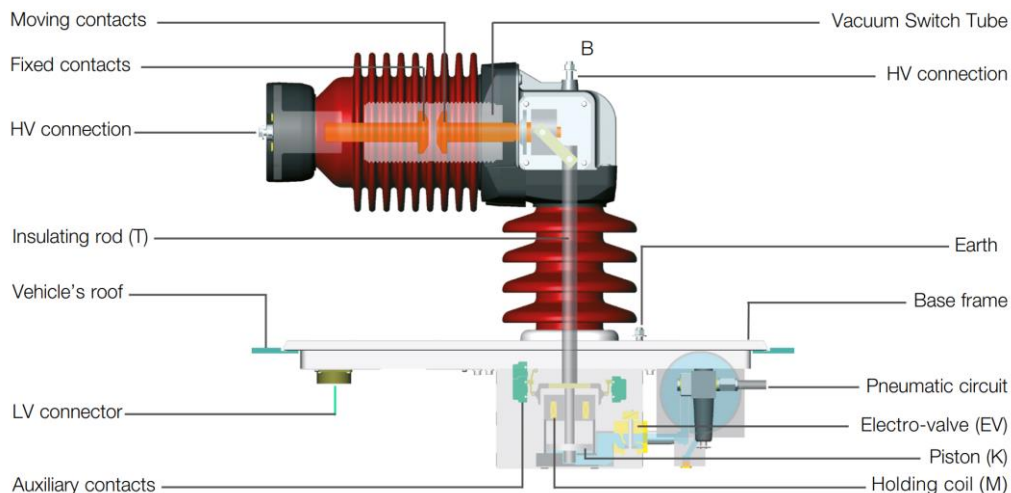
Měřicí transformátory proudu jsou na vysokonapěťové části umístěny před a za primárem transformátoru. Zajišťují diferenciální proudovou ochranu vinutí. Dále jsou umístěny na jednotlivých fázích vedoucích do trakčních motorů, aby zajišťovaly měření proudu na statoru. Tento proud je využíván pro řízení motoru.



Obr. 3-2 Měřicí transformátor napětí (vlevo) [11] a proudu (vpravo) [12]

### 3.3 Hlavní vypínač

Jako hlavní vypínače se používají vakuové, které fungují následovně. Nejprve se pneumaticky uzavře hlavní kontakt se sítí. Ten je poté držen pomocnými cívkami. Jakmile se ale proud v pomocných cívkách přeruší, kontakt se uvolní a vypínač se odpojí od sítě. Vypínač se používá k ochranně vozidla před poruchovými stavy trakční sítě [13].



Obr. 3-3 Vakuový vypínač Secheron [13]

### 3.4 Hlavní transformátor

Hlavní napájecí transformátor napájí pulzní čtyřkvadrantový měnič. Z toho plyne několik požadavků na jeho vlastnosti. Prvním je požadavek na vysokou rozptylovou indukčnost. To vychází z toho, že díky ní jsou omezeny vyšší harmonické v síti. Pro dobrý účinnost na primáru, kvůli vysoké reaktanci, je také potřeba zajistit, aby na sekundáru byl účinník kapacitní.

Celkový účinník by se tedy ideálně měl rovnat 1 v určitém rozsahu proudů. Tento rozsah lze na úkor účinníku i měnit. Pokud by bylo třeba jednotkový účinník zachovat, tak může při kolísání napětí dojít ke snížení napětí na meziobvodu, a tedy ke zvýšení proudu [14].



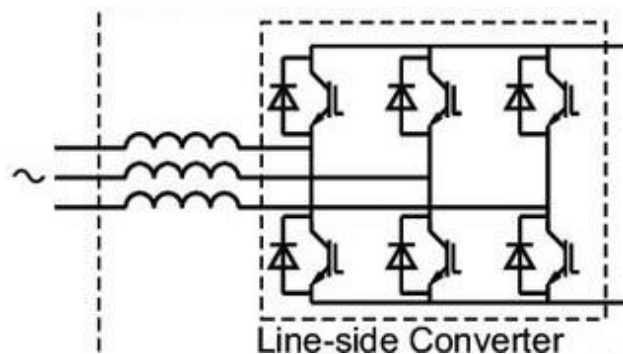
Obr. 3-4 Trakční transformátor SIEMENS 1,8 MVA [15]

### 3.5 Pomocný nabíjecí obvod

Před čtyřkvadrantovým měničem se nachází pomocný nabíjecí obvod. Ten slouží k tomu, aby se omezil proudový ráz při připojení k síti. Proud nejprve poteče přes odpor a až když hodnota napětí na meziobvodu dosáhne 90 % jmenovité, odpor se přemostí, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám.

### 3.6 Čtyřkvadrantový měnič

Další nedílnou součástí trakčních obvodů vlaku je tzv. čtyřkvadrantový měnič. Při připojení jednotky s vysokým výkonem k síti bylo v minulosti nebezpečí vytvoření vyšších harmonických, nebo fázového posunu. Aby se těmto nežádoucím vlivům zabránilo, začaly se na železnici používat pulzní usměrňovače (čtyřkvadrantové). Ty také přidaly možnost rekuperačního brzdění do sítě.



Obr. 3-5 Schéma zapojení 4QC [16]

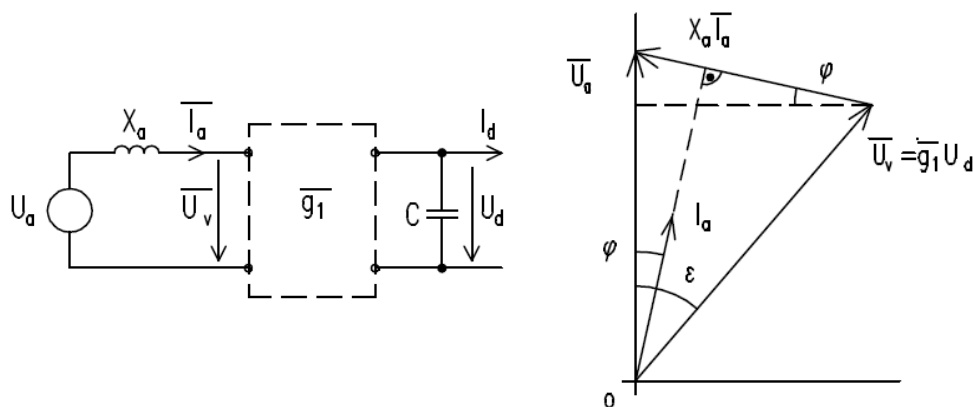
Trakční transformátor může mít více sekundárních vinutí. Ty jsou dimenzovány napětím meziobvodu. Pulsní usměrňovač (dál jako 4QC) je dimenzován na maximální výkon. (Střídač na maximální rozjezdový proud.)

Mezi měniči se nachází stejnosměrný obvod. To znamená že na stejnosměrné straně mají tyto dva měniče stejný proud a napětí. Činnost měničů je určena tím, zda vlak akceleruje nebo brzdí. Když vlak akceleruje nebo udržuje rychlost funguje 4QC jako usměrňovač a měnič u motorů jako střídač. Naopak, když však vlak brzdí a rekuperuje, je jejich funkce opačná. 4QC tedy střídá a měnič u motorů usměrňuje.

Na každý měnič jsou ale jiné požadavky. Zatímco motorový měnič je řízen PWM (pulsně šířková modulace) a má na střídavé straně proměnný kmitočet a velikost napětí, 4QC má stálý kmitočet a napětí. 4QC je také řízen s PWM s požadavkem na účinník 1. harmonické proudy ze sítě.

#### 3.6.1 Řízení 4QC

Pro ovládání 4QC se používá PWM. Základní požadavek na 4QC je udržení konstantního napětí na meziobvodu. To se může měnit s různou zátěží, kolísáním napájecího napětí, nebo změnou reaktance v napájení. Proto lze z následujícího fázorového diagramu pro 4QC odvodit podmínka pro jeho řízení [14].



Obr. 3-6 Náhradní schéma a fázorový diagram 4QC [14]

Kde  $U_a$  je napětí na sekundáru,  $X_a$  charakterizuje rozptylovou reaktanci,  $I_a$  proud na výstupu sekundáru,  $U_v$  napětí na vstupu do usměrňovače,  $C$  je celková kapacita meziobvodu,  $I_d$  proud meziobvodem,  $I_z$  proud zátěže a  $U_d$  napětí meziobvodu. Za předpokladu vyhlazeného napětí na meziobvodu a sinusového napájecího napětí, lze odvodit tuto rovnici:

$$g_1 \sin \varepsilon = \frac{X_a I_z}{U_a} \quad (3-1)$$

Tuto rovnici lze chápat jako podmínku, která je plněna právě řízením 4QC pomocí  $g_1$  (tento koeficient vyjadřuje „poměrné otevření“ meniče), nebo jeho fázovým posunem  $\sin \varepsilon$ . Pokud tato podmínka není splněna, bude napětí na meziobvodu stoupat nebo klesat. To, jak rychlá bude tato změna ovlivňuje velikost kapacity  $C$ .

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{I_d - I_z}{C} \quad (3-2)$$

Dalším požadavkem na regulaci je ovládání fázového posunu na transformátoru. Většinou je požadován účinník roven 1, to znamená že by preferovaný fázový posun první harmonické byl roven 0. Toho je docíleno manipulací fázového posunu koeficientu  $g_1$ .

Maximální napětí je omezeno:

$$g_{1max} = \frac{\max U_a}{U_d} = \frac{1}{2} \sqrt{2} \quad (3-3)$$

$$U_{vmax} = U_d g_{1max}$$

### 3.6.2 Vyšší harmonické na střídavé straně měniče

Měnič je zdrojem vyšších harmonických, které by se mohly skrz transformátor dostat zpět do trakční sítě (v Čechách i do distribuční). Velikost proudu vyšších harmonických je dán způsobem modulace a počtem impulsů za periodu (ty jsou pevně dané podle spínacích ztrát součástek). Výsledný obsah vyšších harmonických lze ovlivnit reaktancí  $X_a$  (proto je požadována vysoká hodnota rozptylové indukčnosti na transformátoru). Jelikož obsah vyšších harmonických nezáleží na zátěži, bude jejich podíl při nižším zatížení vyšší než při zatížení vysokými proudy.

### 3.6.3 Střídavá složka proudu na stejnosměrné straně měniče

Na stejnosměrném meziobvodu se vlivem pulsního usměrňovače objevuje kromě stejnosměrné i střídavá složka. I v případě ideální modulace se zde vyskytuje střídavá složka o dvojnásobném kmitočtu napájecí sítě. Její velikost závisí na velikosti sekundárního proudu a koeficientu  $g$  pro

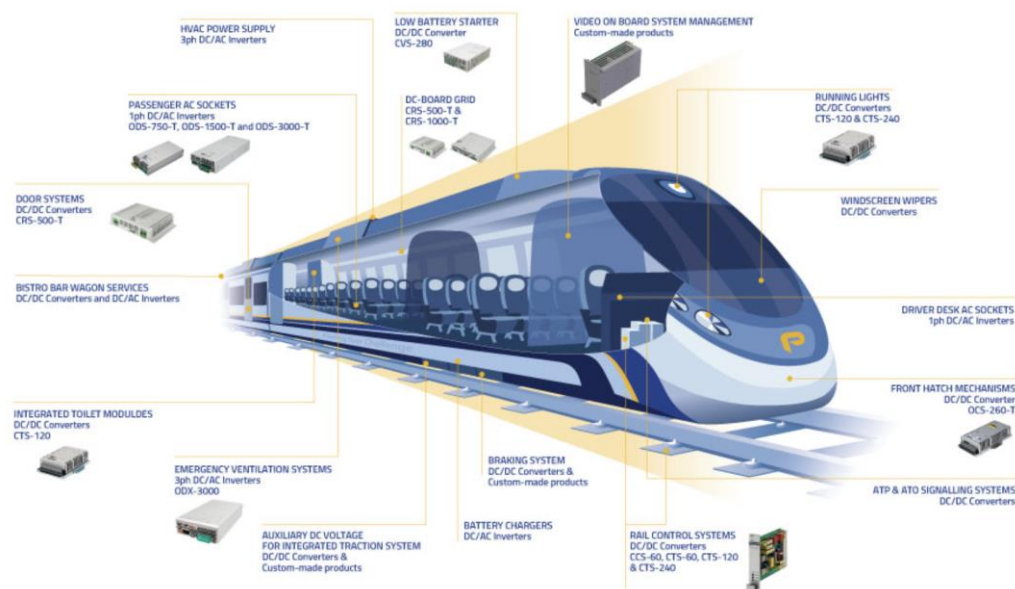
ovládání otevření měniče. Zvlnění ovlivňuje velikost kapacity kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu. V případě, že je zvlnění příliš vysoké, musíme aplikovat filtr na 2. harmonickou [14].

### 3.7 Brzdový chopper

V případě, kdy na meziobvodu při brzdění vzniká napětí vyšší, než je možno rekuperovat do sítě nebo do pomocných pohonů, je třeba přebytečnou energii pálit v pomocném brzdovém odporu. Pomocí DC/DC měniče je řízeno množství zmařené energie.

### 3.8 Měnič pro pomocné systémy vlaku

Vlak má kromě trakčního měniče ještě měnič pro takzvané pomocné systémy („Auxiliary systems“). Ten odebírá z meziobvodu stejnosměrnou energii, kterou mění na střídavou. Tento zdroj se tedy používá k napájení různých vlakových systémů, které slouží k zvýšení komfortu interiéru pro cestující a strojvedoucího. Jedná se například o klimatizaci, topení, vnitřní světla, displeje a podobně. Také tento měnič napájí malou vozovou baterii, různá čerpadla a kompresory nutné pro řádnou funkci vlaku.



Obr. 3-7 Různé pomocné vlakové systémy [17]

### 3.9 Napěťový střídač

Z meziobvodu je také napájen napěťový střídač. Napěťový střídač zajišťuje ovládání a napájení trakčních elektromotorů. Nejnovější střídače obsahují moderní polovodičové výkonové SiC IGBT tranzistory, jež zvládají rychlé spínací frekvence (v řádu několika kHz) a zároveň vysoké proudy.





Obr. 3-8 Napětový střídač Mitsubishi [18]

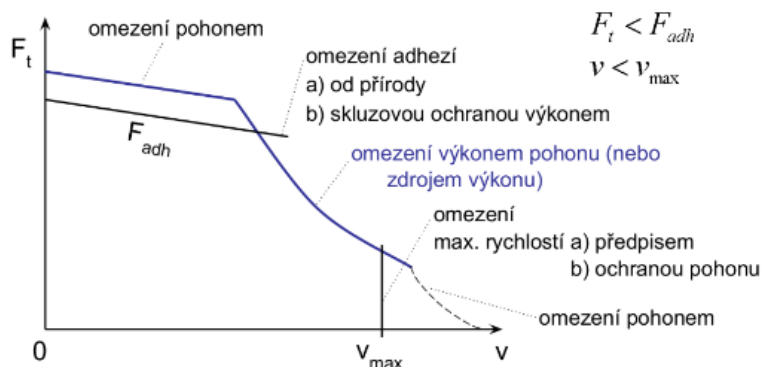
K řízení napětového střídače se může používat několik modulačních strategií. Jsou jimi přímé řízení momentu (DTC), vektorové řízení (FOC) a obdélníkové řízení. Řízení FOC spočívá v tom, že proud pomocí Clarkovy a Parkovy transformace jsme schopni rozdělit na dvě složky, z nichž jedna nám ovládá magnetický tok motoru („nabuzení“) a jedna ovládá moment motoru. Poté se ve střídači pomocí sinusové modulace vygenerují spínací signály pro jednotlivé IGBT tranzistory.

### 3.10 Asynchronní motory

V rámci této práce motory napájené z měničů jsou motory asynchronní. Pro trakci se používají třífázové asynchronní motory s kotvou nakrátko, které jsou napájené z napětového střídače. Výkony těchto motorů se pohybují v řádech stovek kW. Jsou zasazeny v hnaných nápravách. Výstupní charakteristika těchto motorů bude odpovídat trakčním charakteristikám celého vlaku. Moment tedy bude omezen výkonem motoru a také adhezí mezi kolem a kolejnicí. Pro zvýšení momentu na obvodu kol používáme převodovky. Díky převodu se na úkor nižší rychlosti otáčení zvýší moment.

#### 3.10.1 Trakční charakteristika ASM

Pro elektrickou trakci jsou zásadní trakční charakteristiky. Ty vycházejí z momentových charakteristik, které se přepočítají pomocí mechanického převodového poměru, účinnosti a průměru kol. Trakční charakteristika určuje závislost tažné síly na rychlosti. Bude mít ale mnohá omezení.



Obr. 3-9 Trakční charakteristika [19]

Prvním omezením je omezení v části trakční charakteristiky pod jmenovitou rychlostí. Tam se hlavně jedná o omezení výkonem pohonu. Omezení se zde nachází na úrovni maximálního statorového proudu a maximálním možným napájecím napětím (v tomto případě ze stejnosměrného meziobvodu). Křivka má sklon odpovídající sklonu momentové charakteristiky v lineární části. Omezení v této části dané prostředím je omezení adhezí. Ta se bude lišit podle okolních podmínek a podmínek na styku koleje a kola.

Ve chvíli dosažení jmenovité rychlosti při maximálním napájecím napětí, již křivka na obrázku (Obr. 3-9) kvadraticky klesá. To je z důvodu, že se po dosažení maximálního napětí zdroje zvyšuje rychlost pomocí odbuzování (kvadratické snížení magnetického toku v motoru). Pohony jsou dimenzovány tak, aby maximální rychlosti dosáhly až v oblasti odbuzování. To je proto, že při rozběhu je sice za potřeby maximální moment a tažná síla, co je k dispozici, ale při vyšších rychlostech se již jen udržuje vlak v pohybu, a tak potřebný moment je mnohem nižší.

Poslední omezení maximální rychlostí je také důležité pro ochranu pohonu. Motoru by se totiž při vyšších rychlostech mohl poškodit rotor a jiné otáčivé části v pohonu.

### 3.10.2 Brzdění ASM

K brzdění asynchronních motorů se používá elektrodynamické brzdění. Při zapojení motoru se střídačem při brzdění se energie rekuperuje do stejnosměrného meziobvodu. Střídač v tomto případě zajišťuje buzení magnetického pole a usměrňuje indukované napětí do meziobvodu.

V meziobvodu se generovaná energie může využít různými způsoby. Primárně se využívá k udržování konstantního napětí na meziobvodu. Dále se může využít k napájení pomocného měniče pro pomocné trakční komponenty, jako jsou ventilátory a podobně. V případě přebytku se energie vrací zpět přes transformátor do napájecí sítě. Poslední možnost je zmaření energie jako teplo v odporu. Brzdění do odporu se ze stejnosměrného meziobvodu ovládá takzvaným „brake chopper“. To je stejnosměrný měnič řídící velikost napětím do brzdového odporu a zároveň zajišťuje ochranu proti přepětí na meziobvodu.

#### 3.10.2.1 Druhy brzdění

V případě potřeby motor zabrzdit, je třeba snížit frekvenci na statoru a motor přechází do brzdění. Ve chvíli, kdy generovaná energie v motoru je větší než jeho ztráty, začíná se vracet energie do meziobvodu.

V případě, kdy je požadavek na brzdění s konstantním momentem a meziobvod je napojen na trolej, tak se energie generuje až do té doby, kdy vygenerovaná nestačí na pokrytí ztrát. V tu chvíli se motor začíná brzdit protiproudem. Brzdný moment tedy bude stejný až do chvíle, kdy vlak zastaví. V případě, že meziobvod není napájen z troleje, je možno brzdit elektricky pouze do chvíle, kdy se vygenerovaná energie rovná energii zmařené na ztrátách. Poté je třeba vlak dobrzdit mechanicky [13].

Pokud se požadavek na brzdění vyskytne v moment, kdy se motor otáčí a meziobvod je nabit, začne motor pracovat jako generátor.



Obr. 3-10 Trakční asynchronní motor Siemens [20]

## KAPITOLA 4: REGIONÁLNÍ TRAKČNÍ JEDNOTKY S ALTERNATIVNÍM NAPÁJENÍM

### 4.1 EMU – „Electric Multiple Unit“

Nejtradičtější podobou napájení trakčních jednotek je trolejové napájení. V angličtině je jejich název „Electric Multiple Unit“, a proto se mezinárodně využívá zkratky EMU.

Typická EMU se skládá z několika vagónů, které se na rozdíl od lokomotivou taženého vlaku nedají rozdělit ani přeskupit. Každý vagón nese určité komponenty k zajištění správné funkce vlaku. V prvním a posledním vagónu se zpravidla nachází kabina řidiče. Do kabiny jsou napojeny všechny kontrolní systémy ovládané strojvedoucím.

V dalších vagónech jsou již jak silové, tak komunikační obvody vlaku. Pro regionální dopravu je jeden z požadavků, aby byly vagóny nízkopodlažní. Z tohoto důvodu se veškerá trakční výzbroj může umístit buď na střechu, nebo za kabinu řidiče. Každý vagón nese jinou část výzbroje. Hlavní komponenty, které se na vlaku vyskytují pouze jednou jsou rovnoměrně rozloženy po střechu vlaku. Ostatní jsou, pokud možno, rozloženy symetricky podle potřeby.

#### 4.1.1 Budoucí trendy pro EMU

V mnoha případech u regionální dopravy vyvstává otázka profitu. Tyto linky jsou většinou méně využívané z důvodu vysoké konkurence zejména ze strany automobilové dopravy. Aby se tedy náklady na linky snížily, byl navržen koncept využívající malých lehkých autonomních jednotek. Tyto jednotky by se obešly bez strojvedoucího a nabízely by možnost k ušetření značných výdajů. Tento návrh patří pod projekt Taxirail, který vznikl ve Francii [21].



Obr. 4-1 Projekt Taxirail [22]

Pro rozšíření dopravy s EMU by bylo potřeba zajistit elektrifikaci úseků tratí bez trolejí. Zde vyvstává problém. Elektrifikace může trvat poměrně dlouhou dobu a s požadavky moderní doby, kdy společnost potřebuje bezemisní dopravu co nejdříve, se neshodují. Proto se výrobci upínají k myšlenkám jiného paliva (jako je vodík – HEMU), nebo pro hybridní systém spojující vlastnosti EMU a bateriových vlaků (BEMU). Těmto variantám se věnují následující kapitoly.

#### 4.1.2 Trakční koncept EMU regionální jednotky

V této práci navrhovaná vlaková jednotka slouží pro provoz pouze na střídavé napájecí síti AC 25 kV. Nemusí se proto řešit jiná střídavá napětí, nebo dokonce stejnosměrná.

---

Jelikož je pro regionální jednotky vhodná co nejlevnější konfigurace s nízkou redundancí, bude trakční koncept navržen tak, aby měl co nejmenší počet drahých součástek a nebude potřebovat záložní.

Nejprve je potřeba elektrickou energii převést z napájecího trakčního vedení pomocí sběrače do transformátoru. Hned za sběračem se nachází měřicí transformátor napětí, který kontroluje napětí na trakčním vedení.

Následně se přechází k hlavnímu vypínači, který odpojuje celý systém včetně transformátoru od sítě.

Transformátor se vyskytuje v jednotce pouze jeden, a tedy je vozidlo náchylnější k vyřazení z provozu při jeho poruše. Transformátor se bude nacházet na jiném vagónu než sběrač z důvodu nejlepšího využití místa na střeše vozidla. Před a za primárem transformátoru je měřen proud z důvodu diferenciální proudové ochrany vinutí. Primár je uzemněn přes nápravový sběrač do kolejí.

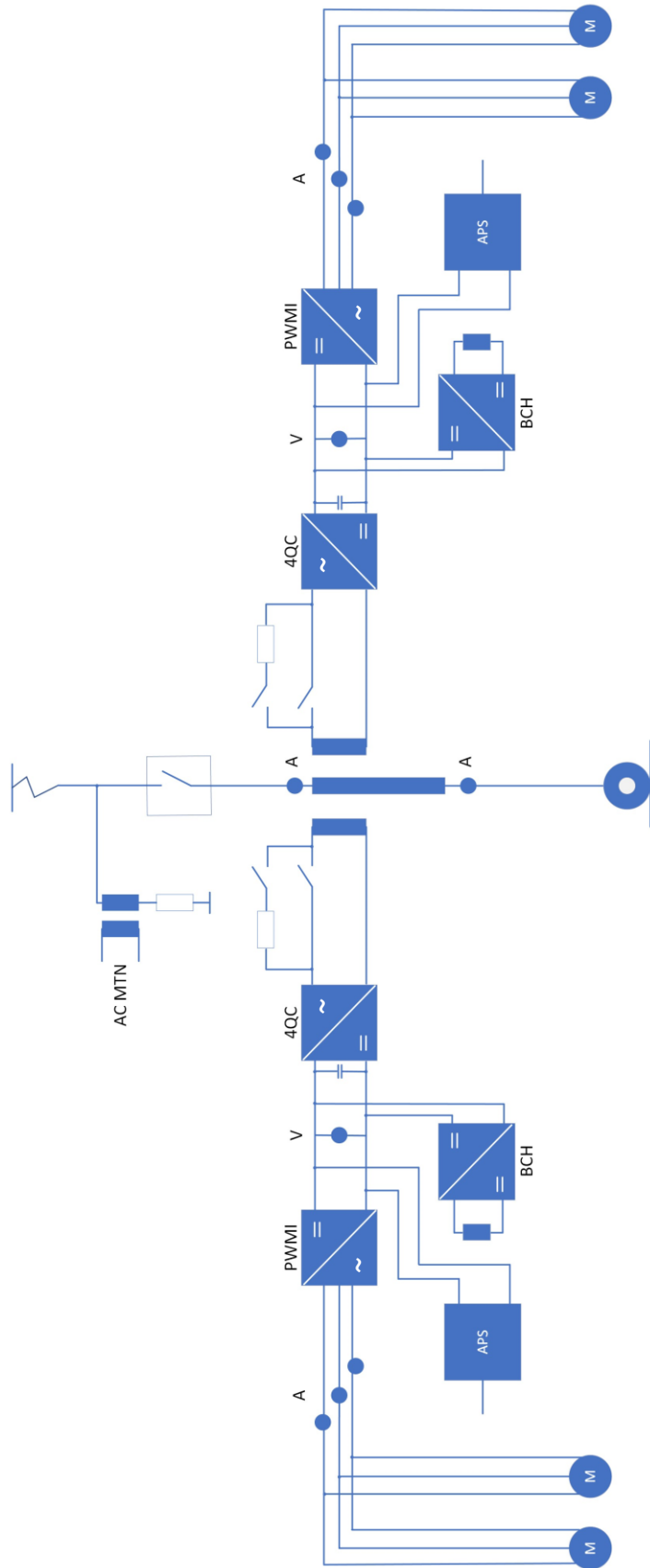
Na vozidle jsou umístěny čtyři hnané nápravy. Dvě na obou koncích vozidla. Sekundáry transformátoru jsou proto symetricky rozloženy tak, že k oběma koncům vozidla vedou stejné komponenty. Hned za sekundárem se nachází nabíjecí obvod přes odpor. Ten omezuje proudový ráz při sepnutí spínače. Po dosažení 90% nominální hodnoty proudu se tento pomocný nabíjecí obvod přemostí zkratujícím spínačem.

Poté se usměrňuje střídavé napětí do stejnosměrného meziobvodu. To je provedeno přes čtyřkvadrantový měnič. Ten totiž nabízí možnost rekuperace energie do trakční sítě v případě elektrodynamického brzdění. Z meziobvodu pak vede několik větví. Hlavní spotřebou jsou trakční měniče pro motory, které stejnosměrné napětí převedou na třífázové střídavé podle požadavku na hnací moment motorů. Tyto střídače pracují s proměnnou amplitudou i frekvencí výstupního napětí. Z jednoho střídače jsou pak napájeny dva paralelně zapojené motory. Opět je zde možnost návratu energie do stejnosměrného meziobvodu.

Další komponenta, která je napájena ze stejnosměrného meziobvodu je měnič pro pomocné systémy vlaku (APS). To znamená například nízkonapěťová baterie, která pomáhá k udržení napětí na meziobvodu, nebo interní systémy vlaku (osvětlení, klimatizace atd.)

Nakonec pro případ, kdy by nestačila rekuperace do pomocných systému a do sítě a napětí na meziobvodu by stoupalo přes povolenou hranici, je zde možnost spálení energie v odporu pomocí brzdového chopperu.

Schéma zapojení tohoto trakčního obvodu je na Obr. 4-2.



Obr. 4-2 Trakční koncept pro EMU

## 4.2 BEMU – „Battery Electric Multiple Unit“

Při analýze alternativních způsobů napájení vlaku nelze opomenout právě bateriové vlaky. „Battery electric multiple unit“ neboli BEMU jsou variantou trolejových vozidel, kde je do vlaku přidána velká trakční baterie pro případ, kdy nejsou dostupné troleje. Tyto baterie se nabíjí, když je vlak připojen na trolej a jsou dimenzovány tak, aby vlak byl schopen dojet až do 100 km vzdáleného místa od elektrifikované tratě.

Baterie bývají umístěné pod vlakem, a tedy musí být dostatečně malé, aby vlak stále splňoval požadavky na nízkopodlažní regionální jednotku. Tím je jejich kapacita také omezena. K baterii také bude potřeba dalšího měniče. Velkou výhodou trakčních baterií ale je, jejich schopnost dobíjení za jízdy. Ta nám dokáže značně prodloužit jejich výdrž.

Ostatní komponenty jsou analogické jako u obyčejné EMU. Díky tomu jsou BEMU jednotky stejně výkonné jako jednotky EMU, to znamená, že dosahují maximální rychlosti až 160 km/h se zrychlením  $1,1 \text{ m/s}^2$ . V částech dopravy, kde dříve tedy jezdily dieselové vlaky, budou pro cestující atraktivnější z důvodu vyšší dynamičnosti jízdy, a tedy vyšší časové efektivity cesty [23].



Obr. 4-3 Siemens Mireo Plus B [24]

### 4.2.1 Budoucí trendy pro BEMU

Jelikož je BEMU u vlaků celkem nová technologie. Je hlavním budoucím cílem rozšířit tyto vlaky po neelektrifikovaných částech tratí, než by se stihly vystavět trakční sítě vedoucí až do odlehlých míst. Často je také důvodem absence trakční sítě těžko přístupný terén. Na tyto tratě by byly také vhodné BEMU.

V současné chvíli například firma Siemens Mobility má projekty na dodání 61 bateriových vlaků po Evropě. Tyto vlaky budou sloužit pro tratě, které nebudou dřív než za deset let elektrifikovány. Jsou zde tedy za účelem nahrazení dieselových vlaků, a tedy zajištění bezemisní dopravy i pro tyto odlehlé oblasti [23].

### 4.2.2 Trakční koncept BEMU regionální jednotky

Jak již bylo řečeno, jednotky BEMU vychází z jednotek EMU. To znamená, že většina trakčních komponent vypadá analogicky. Oproti klasické EMU má další trakční obvod napojený do stejnosměrného meziobvodu. Ten se skládá z měniče a trakční baterie. Měnič DC/DC zajišťuje nabíjení a vybití baterie s konstantní hodnotou napětí.

Tento měnič je typu „buck-boost“ neboli zvyšovací a snižovací a je ovládán tak, aby se baterie pohybovala v hodnotách 10–90 % SoC, neboli „State of Charge“. Baterie je vyrobena podle

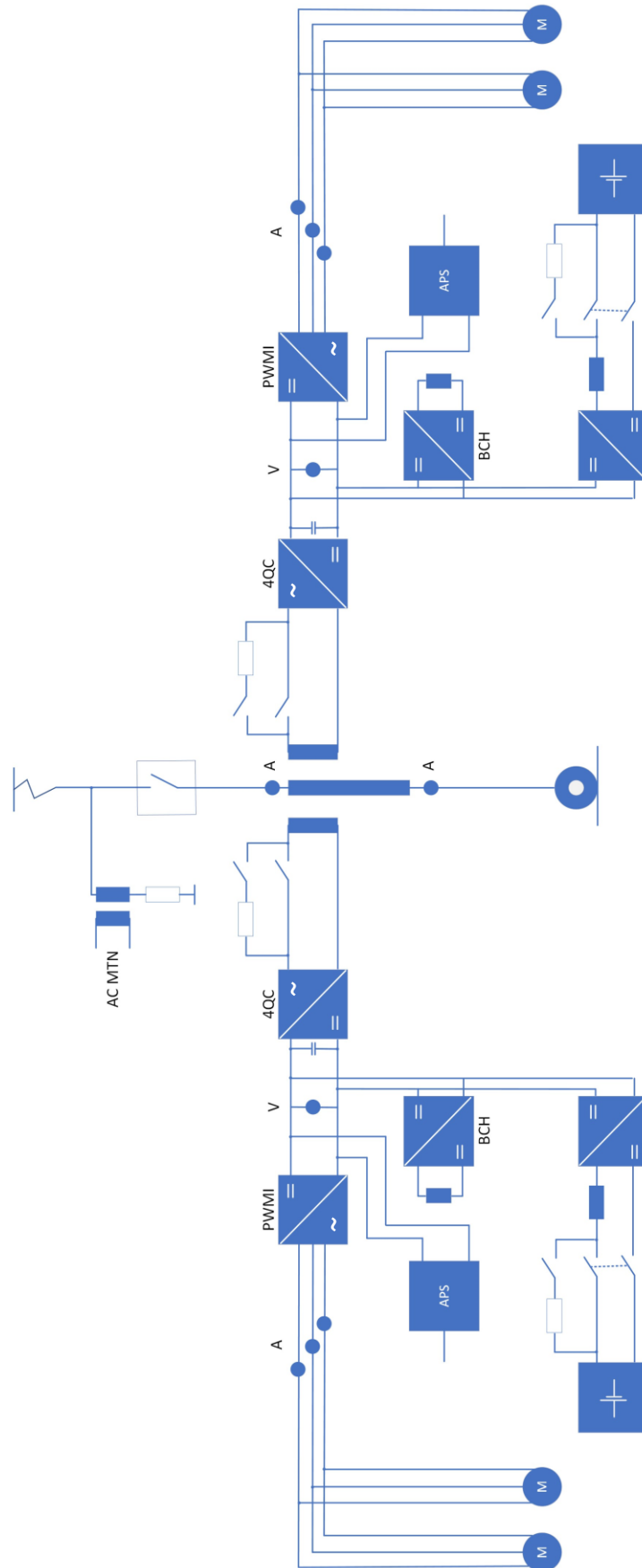
---

technologie LTO, která nabízí jak vysokou energetickou hustotu, tak dlouhou životnost baterie. U baterie je také samozřejmě nabíjecí obvod pro snížení proudového rázu při připojení baterie.

Princip funkce BEMU vlaku je tedy následující. Dokud je vlak připojen k trakčnímu vedení a baterie není nabitá, je výkon čerpán ze sítě pro jak pohon vlaku, tak pro nabíjení baterie. Jakmile je baterii nabitá na nejvyšší dovolenou hodnotu, výkon putuje již stejně jako u EMU jen do motorů a pomocných systémů. Při rekuperačním brzdění se energie primárně jako u jednotek EMU rekuperuje do pomocných systémů, ale následně místo do sítě, se rekuperuje do baterie a tím ji nabíjí.

Rozdíl nastane ve chvíli, kdy vlak vyjede z elektrifikované části trati. Nyní pokračuje pouze z energie nabitě v baterii. Ta nyní přebírá jak pomocné systémy, tak pohon vlaku. Při rozjezdu tedy čerpá energii z baterie a při brzdění do ní zpět rekuperuje. Tím lze prodloužit její dojezd, který je dimenzován tak, aby byl vlak schopen dojet až do stanice vzdálené 100 km, kde se znovu nabije. Takto je vlak schopen ujet vzdálenost delší, než na jakou by byla dimenzována samotná baterie.

Schéma zapojení tohoto trakčního obvodu je na Obr. 4-4.



Obr. 4-4 Trakční koncept pro BEMU



## 4.3 HEMU

Nejnovějším konceptem pro zdroj energie vlaku jsou vodíkové palivové články. Tyto vlaky nabízejí alternativu pro vlaky s fosilními palivy pro dlouhé tratě bez trakčního vedení. Dokáží totiž právě díky palivu v podobě vodíku urazit mnohem delší vzdálenosti než vlaky bateriové (při režimu napájení z baterie).

Ve vlaku se tedy nachází nádrž s vodíkem, který je pomocí palivového článku přeměňován na elektrickou energii. Vodík má výhodu vysoké energetické hustoty.

Hlavní nevýhoda vodíkových vlaků je nyní v podobě špatné infrastruktury doplňovacích stanic. I když díky novým technologiím lze vodík doplnit během 15 minut, jsou čerpací vodíkové stanice málokde. S nástupem této technologie lze, ale očekávat, že se budou budovat stanice nové, a tedy síť, kde lze tyto vlaky provozovat zhoustne.



Obr. 4-5 Siemens Mireo Plus H [25]

V současné době firma Siemens dodá v roce 2024 vlaky pro první německou regionální linku mezi Tübingen, Horb a Pforzheim. Vodík dodávaný pro vlak je vyroben pouze z obnovitelných zdrojů a tím se zajišťuje jeho uhlíková neutralita. Poté co se vodík stlačí, tak se v mobilní jednotce převezve na určené místo, kde se bude vlak dotankovávat. Náhradou diesellových vlaků si Deutsche Bahn slibuje ušetření až 330 tun CO<sub>2</sub> ročně [25].

### 4.3.1 Trakční koncept HEMU regionální jednotky

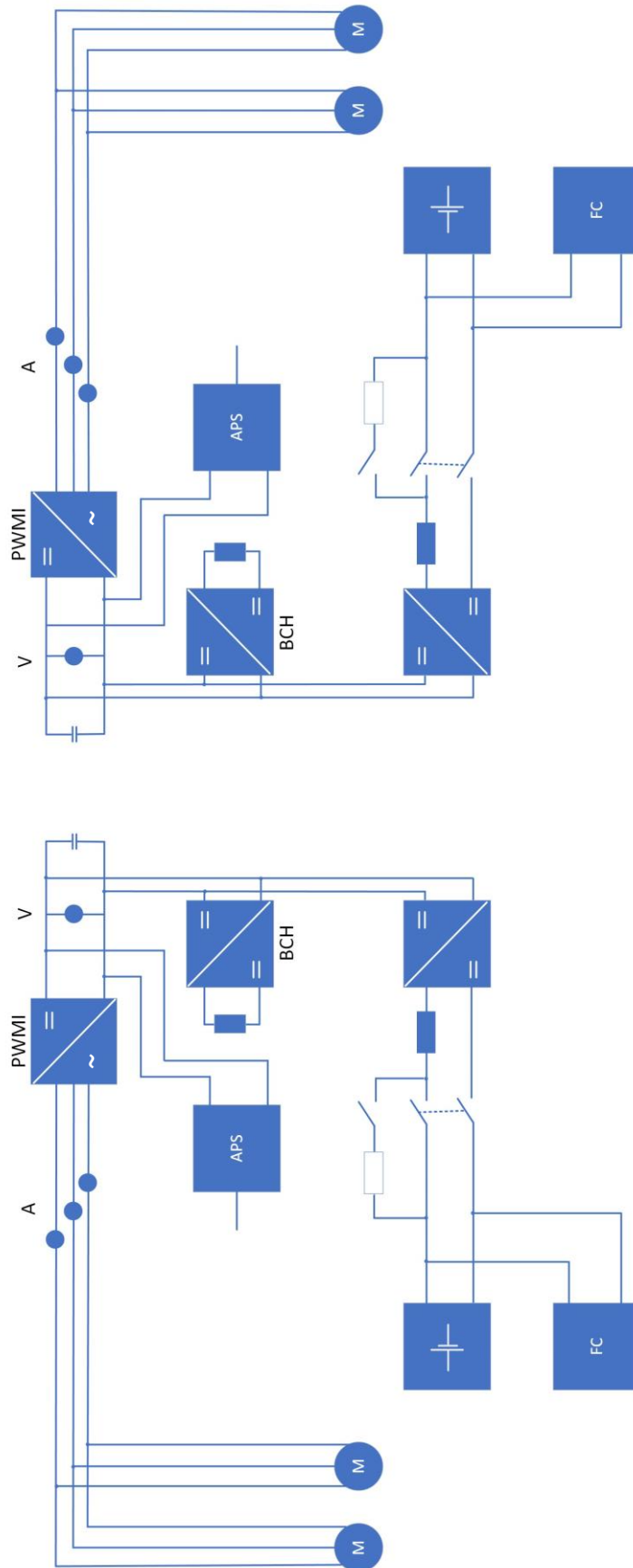
Z důvodu že, zde vůbec není potřeba napojit vlak na trakční síť, vypadá trakční koncept vlaku částečně jinak než v předchozích dvou případech. V tomto případě není potřeba sběrač ani transformátor. Meziobvod tedy není napájen ze čtyřkvadrantového měniče, ale pouze z baterií a palivového článku.

Palivový článek je stěžejní část vodíkového vlaku. Zde dochází k přeměně vodíku na elektrickou energii. Ta se pak pomocí DC/DC měniče přemění, aby nabíjela meziobvod odpovídajícím konstantním napětím. Regulace palivového článku je komplikovaná. Regulace výkonu je pomalá a nelze ji provádět spojitě. Proto má článek 4 stupně regulace. Výkon se reguluje na 25, 50, 75 a 100 %. Palivový článek lze samozřejmě úplně vypnout, ale trvá delší dobu, než se opět zapne.

Součástí obvodu je samozřejmě také trakční baterie. Ta se buď nabíjí rekuperací z motoru nebo právě z palivového článku. Tato baterie nemusí být tak velká jako u BEMU vlaku. Neslouží totiž jako hlavní úložiště energie. Tím je právě nádrž s vodíkem, je ale potřeba, aby bylo kam rekuperovat energii vytvořenou při brzdění.

Z baterie je opět nabíjen meziobvod (nyní má jen střídač na straně vedoucí k motorům). Z meziobvodu je výkon spotřebováván pohonem vlaku, nebo je výkon odebírán při rekuperaci a je ukládán do baterií. Samozřejmě jsou zde analogicky napájeny i pomocné systémy vlaku.

Schéma zapojení tohoto trakčního obvodu je na Obr. 4-6.



Obr. 4-6 Trakční koncept pro HEMU

## KAPITOLA 5: SIMULACE REGIONÁLNÍCH JEDNOTEK

Pro simulaci je potřeba navrhnout několik parametrů pro v této práci zvolenou regionální jednotku. Tato regionální jednotka bude mít pouze dva vagóny a bude se řídit trakčními schématy vytvořenými v kapitole (Kapitola 4:).

### 5.1 Parametry regionální jednotky

Zvolené parametry jsou vypsané v následující tabulce.

Hmotnost vlaku	150 t (160 t BEMU, HEMU)
Převodový poměr převodovky	5,7
d (průměr kol)	0,92 m
$\rho$ (koeficient rotačních hmot)	0,15
Výkon jednotky	1340 kW (4x350 kW)
Počet motorů	4
Napětí sítě	25 kV/50 Hz
Převod transformátoru	25 kV/899 V
Napětí na meziobvodu	1600 V
Kapacita kondenzátoru na meziobvodu	4 mF
Pomocná spotřeba v létě	60 kW
Pomocná spotřeba v zimě	100 kW
Účinnost 4QC	0,95
Účinnost DC/AC	0,98
Účinnost DC/DC	0,97
Jmenovité napětí na baterii	800 V
Kapacita baterie (BEMU)	400 kWh
Kapacita baterie (HEMU)	200 kWh
Jmenovitý nabíjecí proud baterie (BEMU)	500 A
Vnitřní odpor baterie (BEMU, HEMU)	100 m $\Omega$
Účinnost palivového článku (HEMU)	0,6
Jmenovité napětí palivového článku (HEMU)	800 V
Jmenovitý výkon palivových článků (HEMU)	200 kW

Tabulka 1 – Parametry regionální jednotky

Tyto hodnoty budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

Simulace je provedena s pevnou délkou kroku o velikosti 1ms a pomocí solveru ODE 4 (Runge-Kutta).

## 5.2 Trakční charakteristika

Nejprve je potřeba vytvořit trakční charakteristiku pohonu, z požadavků na regionální jednotku. Je požadováno, aby vlak jezdil rychlostí 140 km/h a dokázal při plném výkonu jet se zrychlením 0,8 m/s<sup>2</sup>. Z těchto informací je možno vypočítat následující trakční charakteristiku.

Jelikož má dvou vozový vlak hmotnost 160 tun výpočet síly je dle vzorce:

$$F = m \cdot a = 160\,000 \cdot 0,8 = 128\,000\text{ kN} \quad (5-1)$$

Tato síla slouží pouze k dosažení požadovaného zrychlení bez vlivu jízdnicích odporů. Skutečná tažná síla vlaku bude tedy pro zajištění bezproblémového rozjezdu o 50 kN vyšší.

Vstupním parametrem motoru je požadovaný moment, a proto přepočítáme sílu pomocí známého průměru.

$$M = F \cdot \frac{d}{2} = 128\,000 \cdot \frac{0,92}{2} = 58\,880\text{ Nm} \quad (5-2)$$

Nyní je vypočítaný celkový požadovaný moment na celý vlak a následně je přepočítán moment na jednotlivé motory.

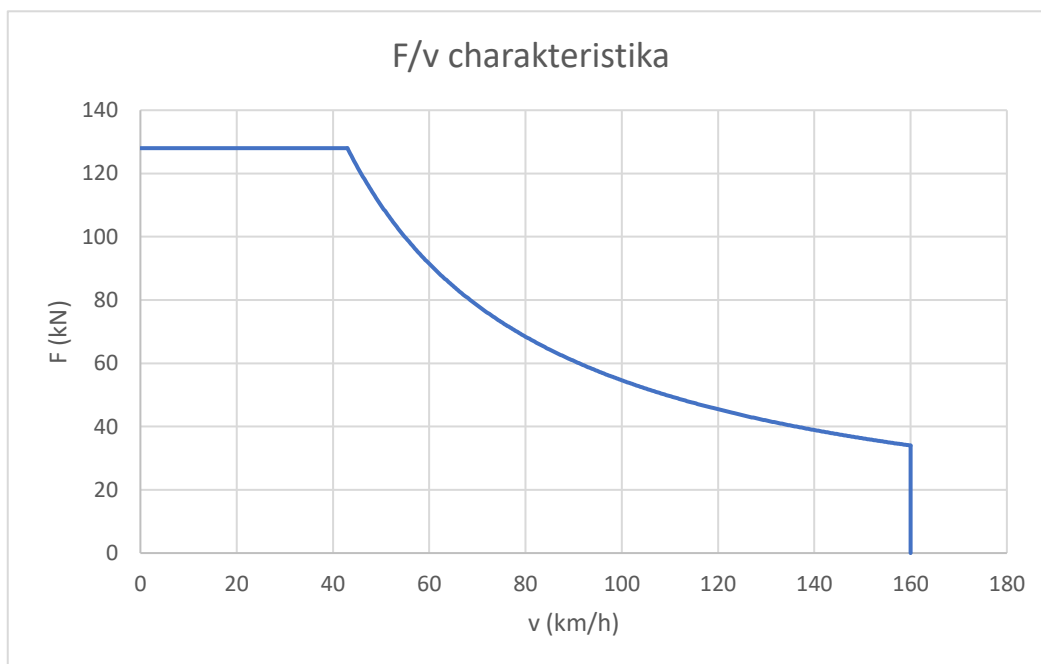
$$M_{motoru} = \frac{M}{4} = \frac{58\,880}{4} = 14\,720\text{ Nm} \quad (5-3)$$

Toto by byl požadovaný moment motoru, kdyby byl převodový poměr 1. Jelikož se ale ve vlaku nachází převodovka, je nutno přepočítat potřebný moment motoru. Převodový poměr udává kolikrát bude moment na obvodu kola vyšší než na motoru a zároveň kolikrát bude vyšší rychlost otáček motoru než na obvodu kola.

$$M_{motoru+převod} = \frac{M_{motoru}}{5,7} = \frac{14\,720}{5,7} = 2\,582\text{ Nm} \quad (5-4)$$

Nyní byl vypočítán moment potřebný k rozjetí vlaku se zrychlením 0,8 m/s<sup>2</sup>. Podle toho je možno nadimenzovat výkony motorů. Byly tedy zvoleny motory s výkonem 335 kW, které by měly splňovat požadavky.

Trakční charakteristika je popsána v kapitole 1.3.1. Bude tedy vypadat následovně.



Obr. 5-1 Trakční charakteristika vlaku

Jmenovitá tažná síla, aby utáhla celý vlak, musí být podle výpočtů 128 kN až do jmenovité rychlosti, která se podle motoru nachází při rychlosti cca 43 km/h. Od této rychlosti dochází k odbuzování, a tedy bude s rostoucí rychlostí klesat tažná síla vlaku až do maximální rychlosti 160 km/h.

### 5.3 Simulovaná trať

Aby simulace odpovídala skutečným datům je potřeba pro všechny vlaky vybrat stejnou trať, kterou lze namodelovat pomocí známých sklonů trati a požadovaných rychlostech na jednotlivých částech trati. Dalším parametrem pro přesnou simulaci by byly poloměry oblouků na požadované trati. Ty se ale bohužel v Čechách v datech nevyskytují, a proto traťový odpor obloukem není započítán a je charakterizován pouze kladným nebo záporným sklonem vyjádřeným v procentech.

Pro simulaci byla zvolena železniční trať Plzeň – Pňovany – Bezručice. Trať byla zvolena jako reprezentativní pro Českou republiku, na níž jsou jak elektrifikované, tak neelektrifikované části. Lze zde porovnat i fungování bateriových a vodíkových vlaků mimo tratě s trakčním vedením.

#### 5.3.1 Data profilu trati

Data jsou pro tuto práci získány z různých zdrojů. Prvním je Správa Železnic. V jejich tabulkách traťových poměrů je možno vyčíst pozice stanic na trati a předepsané traťové rychlosti, které bude simulace následovat. Číslo našich hledaných tratí je 720A (pro část Plzeň – Pňovany) a 714C (pro Pňovany – Bezručice) (viz Obr. 5-2). Ty se pak zanesou do tabulky, která bude vstupem do simulace.



Obr. 5-2 Mapa tratí Plzeňsko [26]

Druhým důležitým parametrem pro simulaci je sklon na trati. Zde ale vzniká problém s čerpáním dat z tabulek traťových poměrů. Správa železnic totiž sklon trati v tabulkách významně zaokrouhluje. Tím vznikají významné chyby na konci simulace. Může se tedy stát, že výsledné nadmořské výšky koncových stanic nebude odpovídat skutečnosti. Proto jsou sklony vypočítané tak, že se vzaly nadmořské výšky jednotlivých stanic a vypočítal se sklon trati mezi nimi. Takto při kontrole odpovídají nadmořské výšky realitě. Údaje o nadmořských výškách stanic jsou ze stránek Zelpage.cz

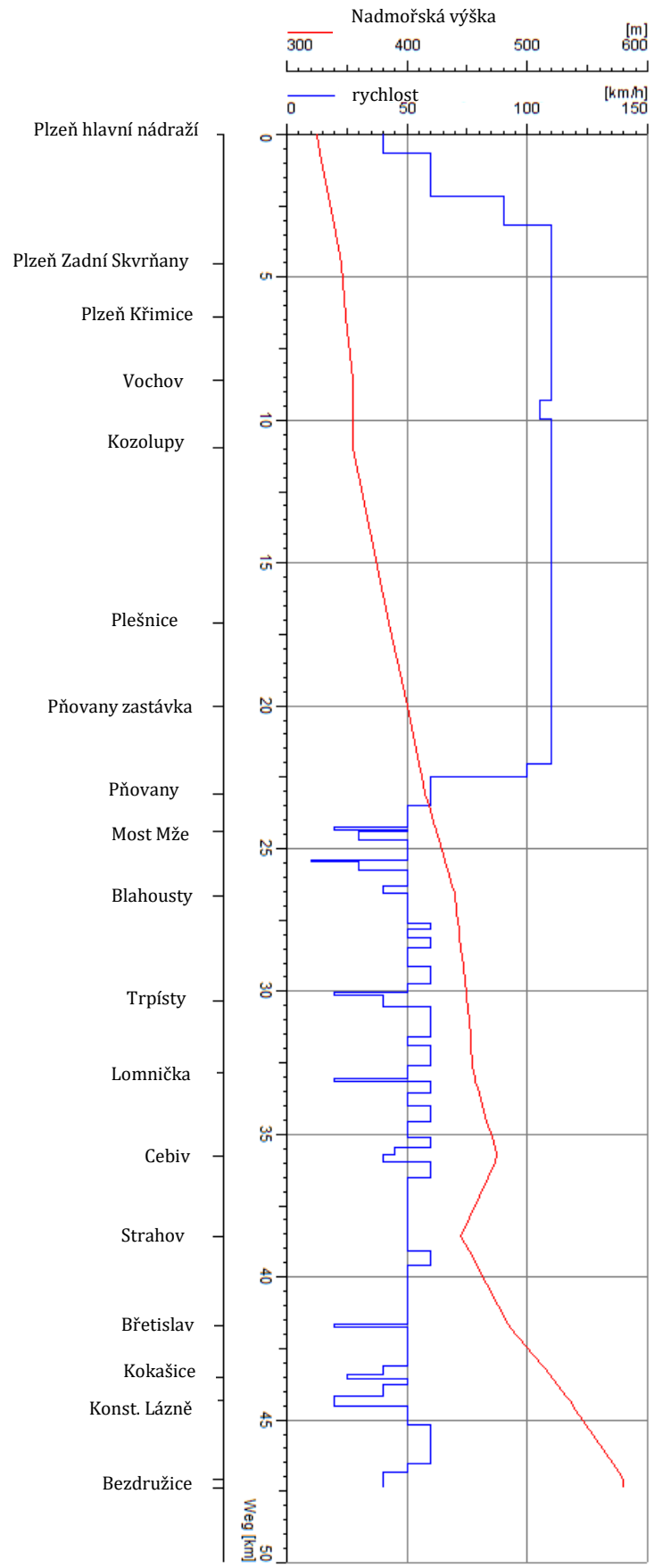
Výsledné rychlosti a nadmořské výšky mají na trati následující průběh (viz Obr. 5-4, Obr. 5-5). Na obrázcích je vyobrazen průběh celé simulované trati. Modrou je vyznačena požadovaná rychlost vlaku v daném kilometru trati a červenou je dána nadmořská výška v daném kilometru.

Trati má z Plzně mnohem vyšší kladný sklon do vyšších nadmořských výšek a lze tedy očekávat, že v tomto směru bude nižší rekuperace než ve směru opačném.

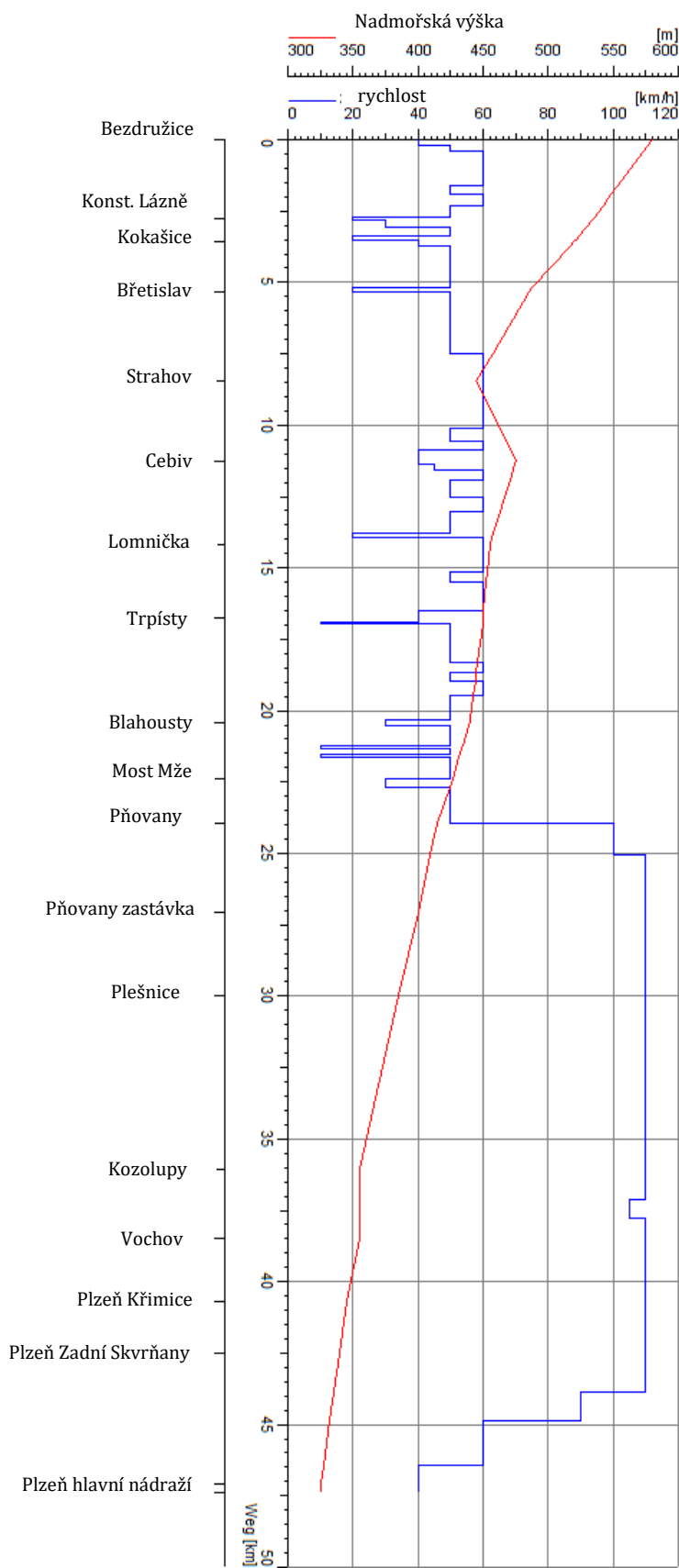
Důležité je poznamenat, že ve stanici Pňovany končí elektrifikovaná část trati. Jednotka EMU je tedy simulována jen do této stanice. Projíždí jen část trati, kde je vyšší rychlost. Naopak jednotky BEMU a HEMU je možno porovnat podle jejich vlastnostech na trati Pňovany – Bezručice, kde dochází k výraznému stoupání a kolísání povolené rychlosti vlaku. Je tedy potřeba vyšší dynamičnost jízdy.

km	km	typ	stanice
65	žst	<b>Plzeň hlavní nádraží</b>	(325m) [PM] <b>160 170 176 180 191</b>
66		<b>Plzeň-Jižní Předměstí</b>	(330m) [PM]
69		<b>Plzeň-Zadní Skvrňany z</b>	[PM]
71	žst	<b>Plzeň-Křimice</b>	(345m) [PM]
73		<b>Vochoz z</b>	(355m) [PS]
76	žst	<b>Kozolupy</b>	(355m) [PS]
82		<b>Plešnice z</b>	(385m) [PS]
85		<b>Pňovany zastávka z</b>	(400m) [PS]
88	žst	<b>Pňovany</b>	(415m) [PS] <b>177</b>

Obr. 5-3 Data ze stránek Zelpage.cz [27]



Obr. 5-4 Profil trati Plzeň – Pňovany - Bezručice



Obr. 5-5 Profil trati Bezručice – Přovany - Plzeň



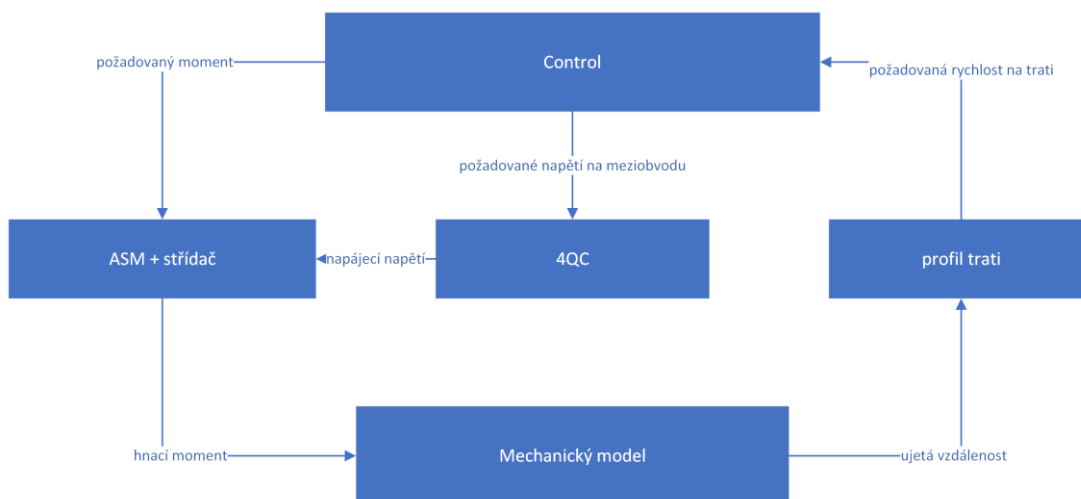
## 5.4 Simulace EMU jednotky

Jako první je simulována jednotka EMU. Z hlediska trakčního obvodu se jedná o nejjednodušší typ vlaku, kterým se práce zabývá. Jak je výše zmíněno, průběh hodnot je simulován na reálné trati Plzeň – Pňovany a zpět.

### 5.4.1 Model EMU v SIMULINKu

Pro vytvoření modelu v SIMULINKu se práce drží trakční koncepce vytvořené v kapitole 4.1.2. V modelu tedy jsou jednotlivé bloky představující jednotlivé části trakčního obvodu.

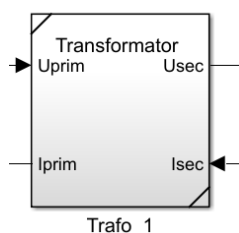
Koncept modelu je následující. Celý vlak je řízen blokem CONTROL. Tento blok podle profilu trati a požadované rychlosti generuje požadovaný moment pro motory a zároveň se zde udává jaké je potřeba napětí na meziobvodu. Výstupem je tedy číselná hodnota stejnosměrného napětí, na kterou se v bloku čtyřkvadrantového měniče reguluje napájecí napětí pro střídač a motory. Ty podle požadovaného momentu odebírají energii z meziobvodu. Z asynchronního motoru potom vychází kroutcí moment, který vstupuje do bloku mechanického modelu vlaku. Zde se pomocí vozidlových a jízdních odporů přepočítá na reálnou tažnou sílu vlaku a na aktuální rychlost. Výstupem z mechanického modelu je ujetá vzdálenost, která udává pozici na trati a vytváří vstup do profilu trati, kde je vyhodnocena požadovaná rychlost, která opět vstupuje do bloku CONTROL.



Obr. 5-6 Schematický koncept modelu v SIMULINKu (EMU)

#### 5.4.1.1 Transformátory

Jako napájení celého vlaku je uvažována dokonale tvrdá trakční síť s konstantním napájecím napětím 25 kV. To pokračuje do dvou bloků transformátorů (reálně je na vlaku pouze jeden se dvěma sekundáry), kde se převodem transformátoru změnil na napájecí napětí 899 V s účinností 97 %, podle typické hodnoty účinnosti pro trakční transformátory [28]. Tyto dva sekundáry pak napájí symetricky dvě části trakčního obvodu, ze kterých se napájí dohromady 4 motory pohánějící vlak.

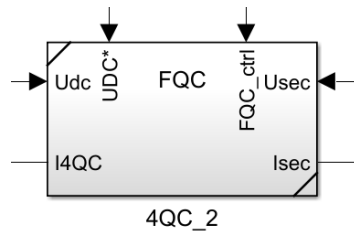


Obr. 5-7 Blok transformátoru

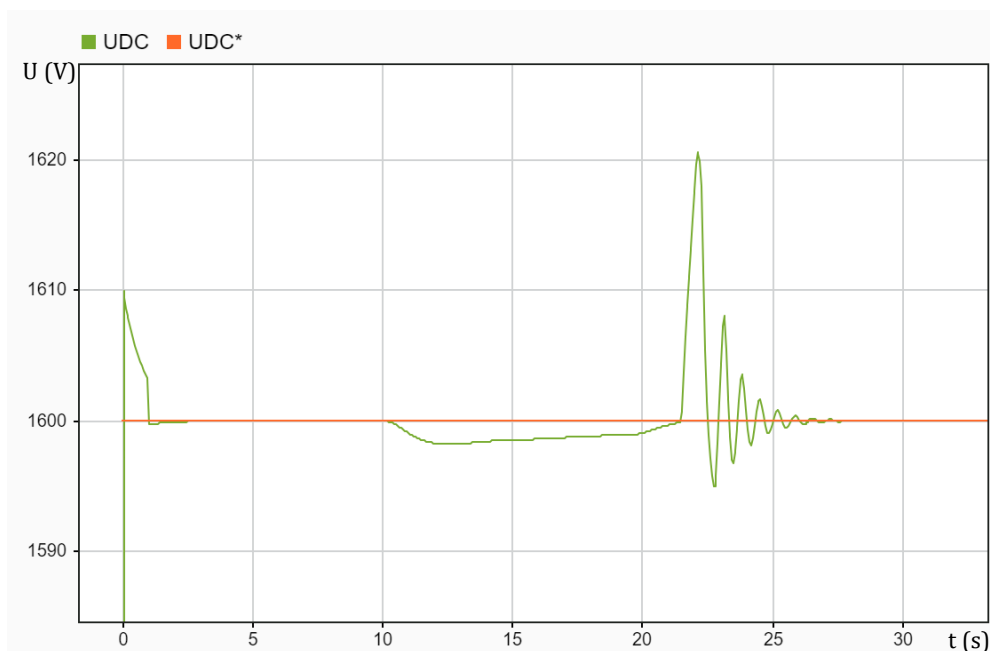
### 5.4.1.2 Čtyřkvadrantový měnič

Čtyřkvadrantový měnič na sekundáru reguluje napětí na meziobvodu na 1600 V. Regulace je v simulaci uskutečněna pomocí zpětnovazebního PI regulátoru. Výstupem tohoto bloku je tedy proud  $I_{4QC}$ , který nám vyjadřuje proud tekoucí mezi meziobvodem a čtyřkvadrantovým měničem. Podle znaménka tohoto proudu bude možno vyčíst tok výkonu. Zda teče do vozidla, nebo se rekuperuje do sítě.

Vstupními parametry tohoto bloku jsou tedy požadované napětí na meziobvodu a signál „FQC\_ctrl“, který zapíná a vypíná měnič, a tedy odběr energie z trakční sítě. Pro zpětnovazební regulátor do bloku vstupuje i reálná hodnota napětí na meziobvodu a napětí na sekundáru transformátoru.



Obr. 5-8 Blok čtyřkvadrantového měniče



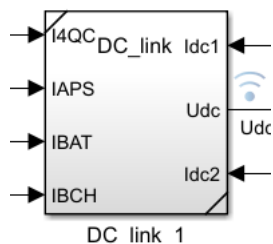
Obr. 5-9 Regulace napětí na meziobvodu

Na obrázku Obr. 5-9 je vyobrazena funkce tohoto měniče při simulaci. Jakmile je vlak připojen na síť, je nabit na 1600 V. Aby nedošlo ke zkratovým hodnotám proudu, je omezen nabíjecím obvodem. Ten dovolí, aby do meziobvodu teklo maximálně 600 A (ze sítě tedy každý primár odebírá maximálně 40 A). Po nabití meziobvodu je tento pomocný obvod odpojen, aby nedocházelo ke ztrátám. Na obrázku lze tedy vidět průběh regulace napětí na meziobvodu.

### 5.4.1.3 Stejnoseměrný meziobvod a pomocné systémy

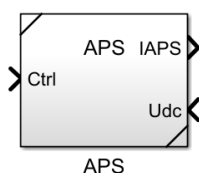
Výstupem měniče je tedy proud  $I_{4QC}$ . Tento proud vychází ze stavu na meziobvodu. Z meziobvodu je podle schématu napájen jak měnič pro dva paralelní asynchronní motory, tak měnič pro pomocné systémy. Je zde vidět také příprava pro bateriový a vodíkový vlak pomocí

vstupů IBAT a IBCH. Ty jsou ale nyní uvažovány jako nulové. V meziobvodu se nachází kondenzátor s kapacitou o hodnotě 4mF.



Obr. 5-10 Blok pomocných systémů

Pomocné systémy vlaku celkově představují v zimních měsících spotřebu 100 kW. Z jednoho meziobvodu je napájeno 50 kW a druhých 50 kW z druhého meziobvodu pro zajištění symetričnosti. V letních měsících není používané vytápění a vlak tedy pouze klimatizuje stanoviště strojvedoucího a prostor pro cestující. Proto se spotřeba pomocných systémů sníží na 60 kW. Tato spotřeba je konstantní i ve chvíli, kdy vlak stojí.



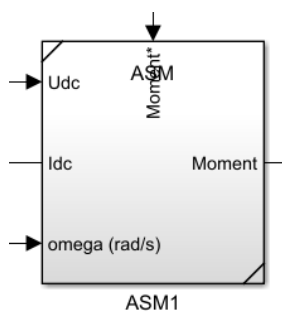
Obr. 5-11 Blok pomocných systémů

V případě, kdy motory rekuperují a proudy tečou do meziobvodu, je prioritně napájen měnič pro pomocné systémy. Až ve chvíli, když je výkon rekuperovaný vyšší než výkon spotřebovaný pomocnými systémy, tak jej lze rekuperovat do sítě.

#### 5.4.1.4 Asynchronní motor

Převod elektrického výkonu na výkon mechanický pak zajišťují bloky asynchronních motorů. Jmenovitý výkon každého motoru je 335 kW. Účinnosti jsou závislé jak na okamžitém výkonu, tak na otáčkách v oblasti odbuzování. V tomto bloku je také započítána účinnost střídače použitého pro napájení motoru. Výstupní hodnota motoru je jeho mechanický moment, který je pak pomocí mechanického modelu převeden na otáčky kol a následně na rychlost vlaku. Motory jsou řízeny z bloku CONTROL, který určuje jejich požadovaný moment. Ať už je kladný pro akceleraci nebo záporný pro elektrodynamické brzdění.

Data pro účinnost motoru použítá v této simulaci jsou majetkem firmy SIEMENS. Proto jsou v elektronické příloze k naleznutí pouze data vedoucí ke konstantní účinnosti 92 %. Tato data lze nahradit daty z libovolného elektrického motoru.



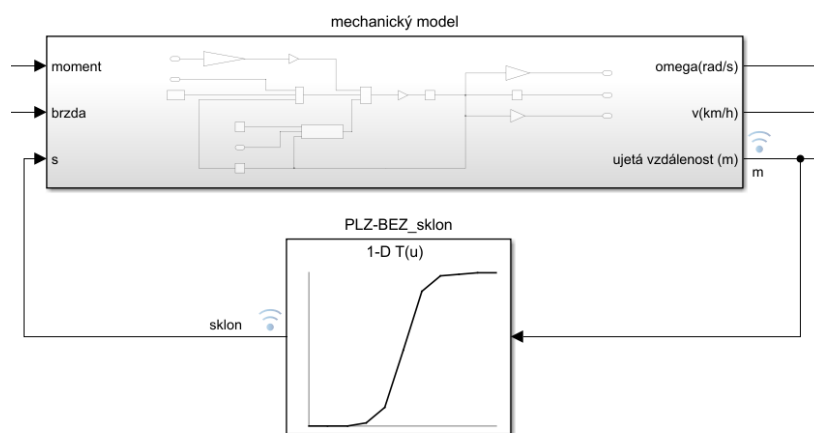
Obr. 5-12 Blok asynchronního motoru

### 5.4.1.5 Mechanický model

Momenty všech asynchronních motorů se tedy sečtou a jsou vstupem mechanického modelu vlaku. Díky převodovce je zvýšen moment na hřídeli. Ten je poté přepočítán na tažnou sílu, od které se musí odečíst síly odporové. Ty jsou popsány v kapitole 1.2.1. Jde o vozidlový a traťový odpor. Vozidlový odpor se odvíjí od rychlosti vlaku a traťový je určen sklonem z dat popsanych v kapitole 5.3. Hodnoty použité pro vozidlový odpor odpovídají průměrným hodnotám pro odpory EMU.

Jakmile je takto vypočítaná hnací síla očištěna o odpor, lze říct s jakým zrychlením se vlak bude pohybovat pomocí setrvačné hmotnosti vlaku se součinitelem rotačních hmot [29]. Ze zrychlení je pak jednoduše určena aktuální rychlost vlaku a ujetá dráha.

V mechanickém modelu je také započítána mechanická brzda. Ta je ovládána z bloku CONTROL pro zabrzdění v jednotlivých zastávkách.



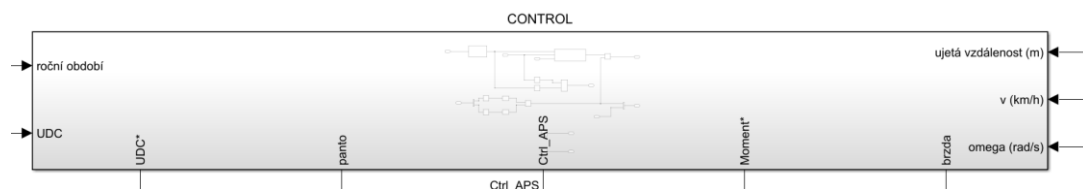
Obr. 5-13 Blok mechanického modelu a modelování sklonu

### 5.4.1.6 CONTROL

Celý model je řízen z bloku CONTROL. Vstupy do tohoto bloku jsou roční období, napětí meziobvodu, ujetá vzdálenost, rychlost vlaku a otáčky kol v radiánech za sekundu.

Roční období určuje, jak vysoká bude spotřeba vlaku bez závislosti na trakčních vlastnostech, a tedy nastavuje jakou hodnotu budou měniče APS odebírat.

Napětí na meziobvodu povoluje nebo zakazuje uvést vlak do pohybu. Pokud hodnota na meziobvodu není vyšší než 400 V, vlak nedostane pokyn k rozjezdu a počká na nabití.

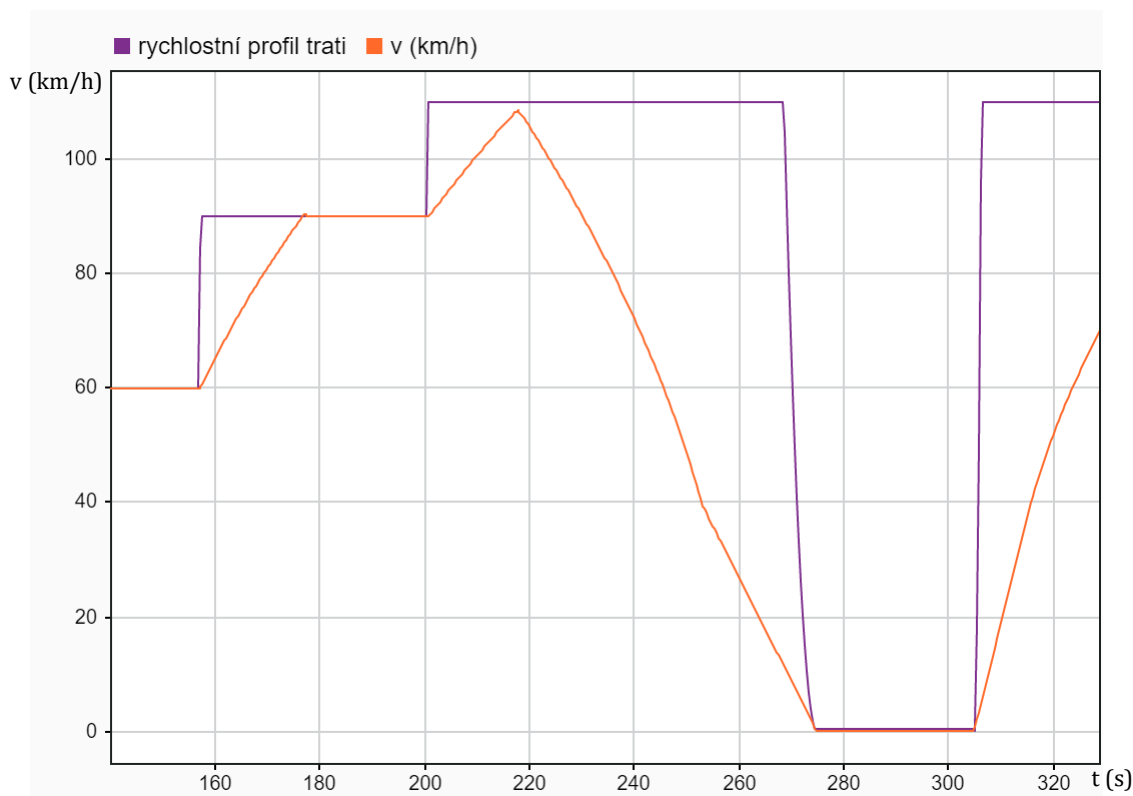


Obr. 5-14 Blok CONTROL

Ostatní vstupy již souvisí s řízením vlaku (náhrada strojvedoucího simulací). Aby vlak projel modelem předurčenou tratí a zastavil ve všech zastávkách, je třeba znát pozici na trati, aktuální rychlost a rychlostní profil trati.

Z pozice na trati je vypočítána MATLAB funkcí vzdálenost do další zastávky. Potom je určena nejvyšší hodnota zrychlení, se kterou může vlak zpomalovat, a to  $1 \text{ ms}^{-2}$  (kvůli komfortu

cestujících). Z těchto předpokladů je určena maximální rychlost v určité vzdálenosti před zastávkou. Vlak se tedy zpomaluje tak, že je plynule regulován na tuto rychlost.



Obr. 5-15 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě

V regulátoru rychlosti je tedy určeno požadované zrychlení (tažná síla) vlaku, aby se dosáhlo při simulaci požadované rychlosti. Výstupem tohoto bloku je požadovaný moment pro jednotlivé motory. Moment je omezen dvěma faktory. Výkonem vlaku a maximálním momentem, který jsou motory schopny dodat. Jakmile je tedy moment omezen, tak je již předáván na vstupy jednotlivých motorů.

Když vlak přijede do zastávky a zastaví, spustí se v bloku řízení požadované rychlosti stavový automat. Tento automat zajišťuje, že vlak v zastávce stojí 30 vteřin, a poté se znovu opět rozjede na maximální dovolenou rychlost na daném úseku trati. Ve chvíli, co stojí, je také aktivována mechanická brzda v mechanickém modelu vlaku.

Pro zpomalování vlaku podle traťových limitů se využívá předpokladu, že strojvedoucí vidí zhruba 50 metrů na trati před sebe a rozezná povolené rychlosti. Proto brzdění přijde vždycky o tento počet metrů dřív, než je nižší povolená maximální rychlost.

Na konci trati vlak zastaví a do konce simulace je zapnutý (tudíž běží pomocné systémy vlaku). Jak model vypadá lze nalézt v příloze B.3.

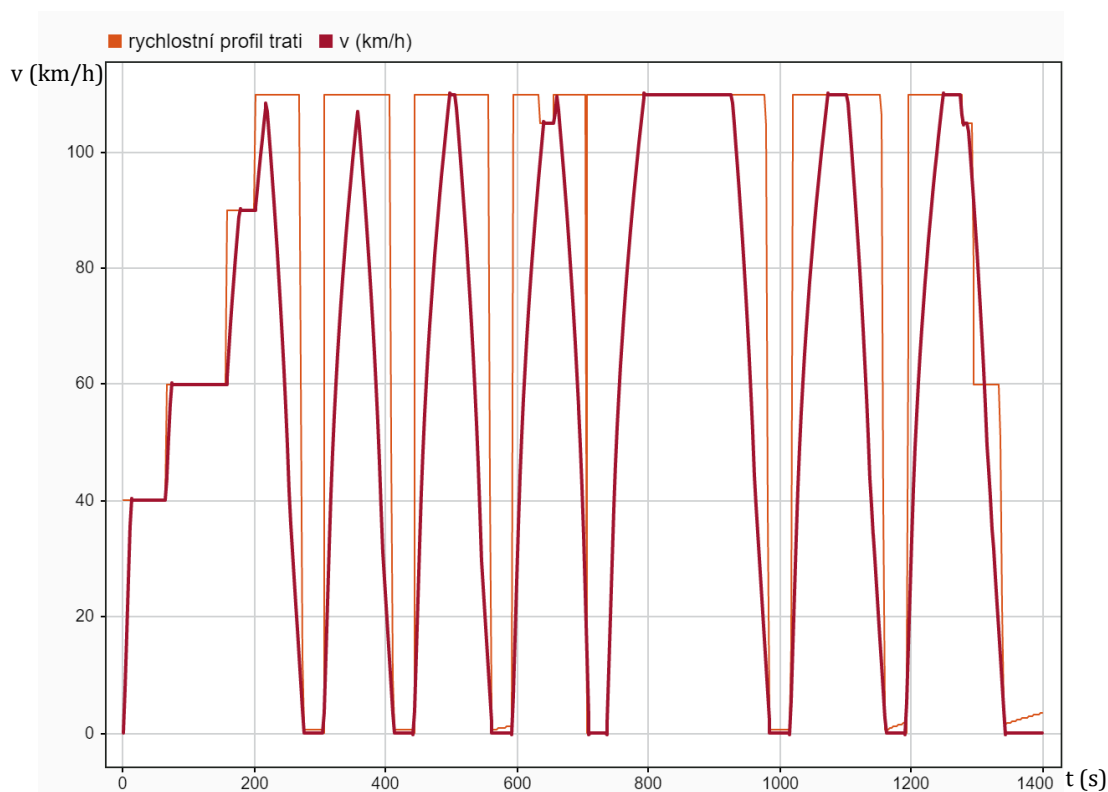
## 5.4.2 Důležité výsledné průběhy na tratích

Pro porovnání alternativních napájení vlaků jsou stěžejní hlavně jejich spotřeby energie, a vhodnost pro danou trať.

### 5.4.2.1 Trať Plzeň – Pňovany

Nejprve se simuluje trať vedoucí z Plzně do Pňovan. Její rychlostní profil je poměrně vysoký a většina trati má maximální povolenou rychlost 110 km/h. Na trati je 6 mezizastávek, kde vlak

podle simulace zastaví a čeká 30 sekund, než se opět rozjede. Reálné rychlosti vlaku jsou vyobrazeny na obrázku Obr. 5-16.



Obr. 5-16 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (EMU – PLZPŇO)

Z průběhů lze vidět, že vlak z každé zastávky rovnoměrně zrychluje, dokud nedosáhne maximální povolené rychlosti, nebo již začíná brzdit do stanice následující. Tento graf bude sloužit jako vodítko pro ostatní průběhy veličin, které budou v této kapitole zmíněny.

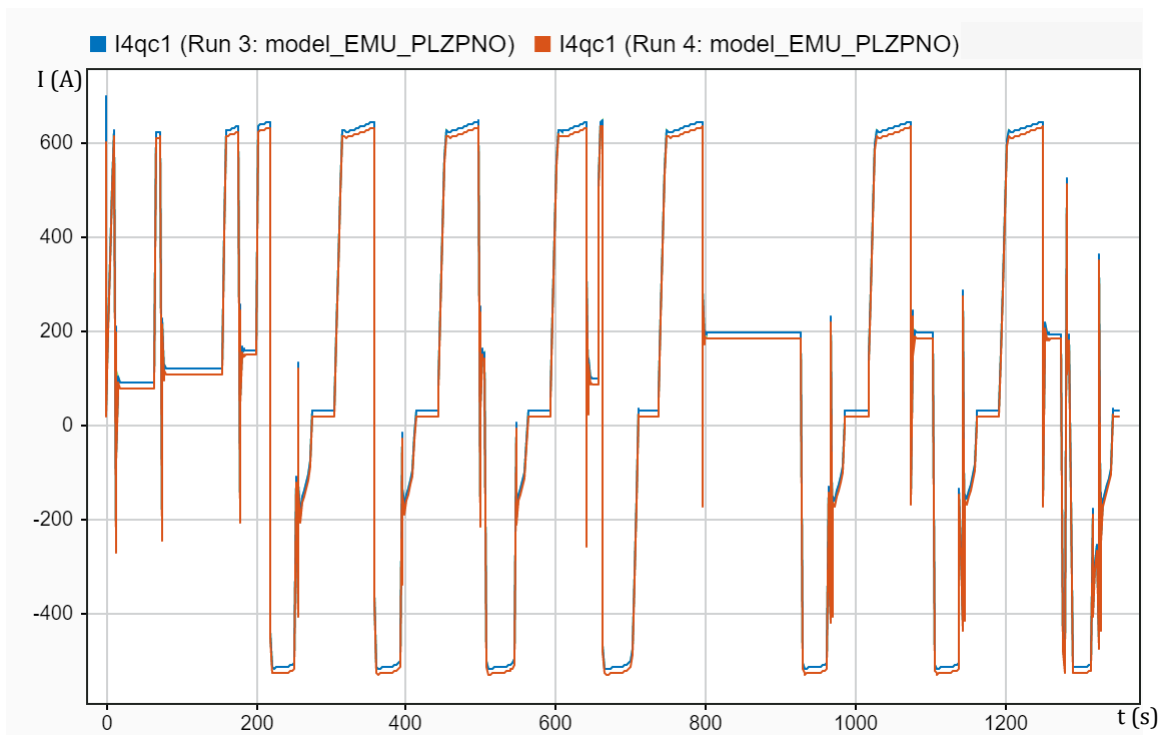
Ze všech průběhů zde byly vybrány jen ty, které jsou vypovídající o spotřebě vlaku. Průběhy ostatních veličin jsou možné dohledat v příložené simulaci v MATLABu.

Na obrázku Obr. 5-17 je vyobrazen průběh proudů, které vedou z čtyřkvadrantového měniče do meziobvodu. Z těchto proudů je možné určit, zda vlak spotřebovává energii ze sítě nebo do ní zpět rekuperuje. Podle předpokladů tedy jednotka spotřebovává nejvyšší proud při rozjezdech. Když se vlak rozjíždí, dosahuje proudů až 650 A. Naopak když se rychlost ustálí a vlak se jen udržuje v pohybu je jeho spotřeba zhruba třetinová. Na grafu jsou vyobrazeny dva průběhy. Jeden je platný pro letní měsíce a druhý pro zimní. Je vidět, že zimní měsíce oproti letním se liší výraznější vlastní spotřebou na vytápění. Proto je proud tekoucí při spotřebě o tuto hodnotu vyšší. Důsledkem je pak, že i při rekuperaci je získáváno zpět méně energie, protože se jí více maří ve vlaku.

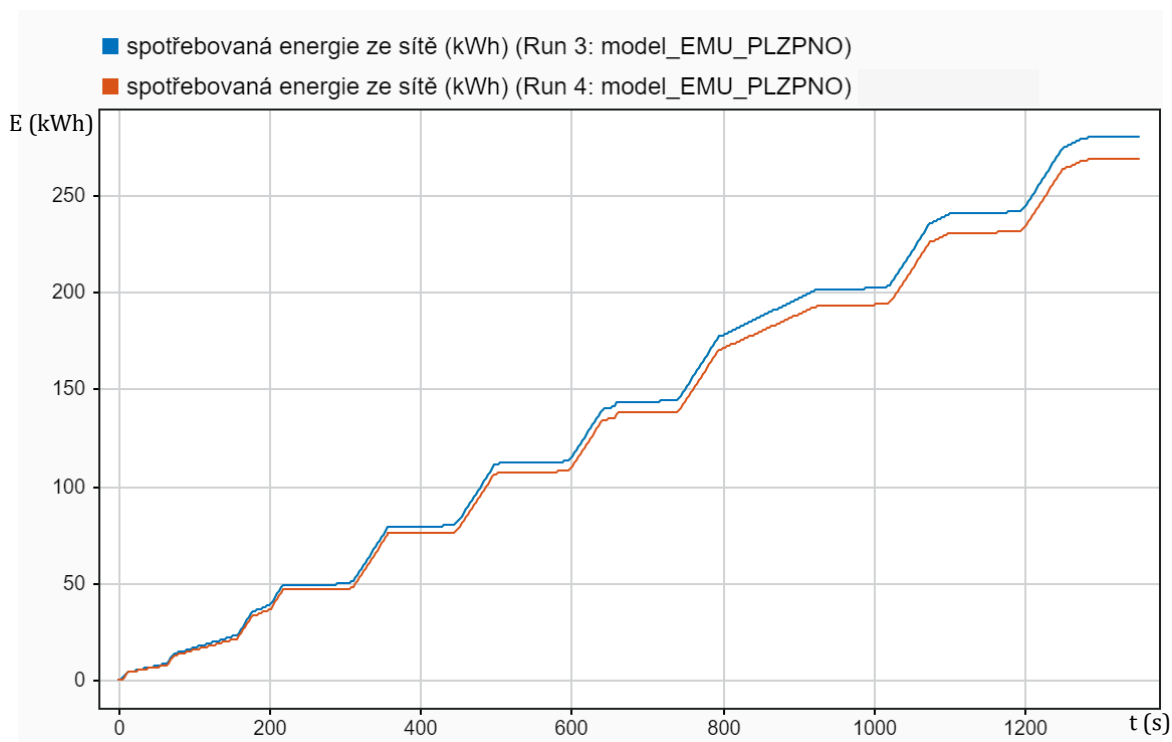
Na obrázcích Obr. 5-18 a Obr. 5-19 jsou již výsledné průběhy spotřebované energie a rekuperované energie do sítě. Tyto průběhy se řídí průběhem výše zmíněného proudu. Lze tedy pozorovat, že s vyššími proudy I4QC i rychleji roste spotřebovaná energie. V místech, kde zůstává spotřebovaná hodnota energie konstantní vlak brzdí a rekuperuje. V tu chvíli je již veškerá spotřeba vlaku pokrytá. V těchto momentech narůstá energie rekuperovaná do sítě.

Opět si lze na obou grafech povšimnout rozdílu mezi zimními a letními měsíci, který odpovídá konstantní spotřebě. Ve výsledku spotřeba vlaku v zimních měsících na této trase odpovídá 281 kWh. V letních bude spotřeba o zhruba 12 kWh nižší.

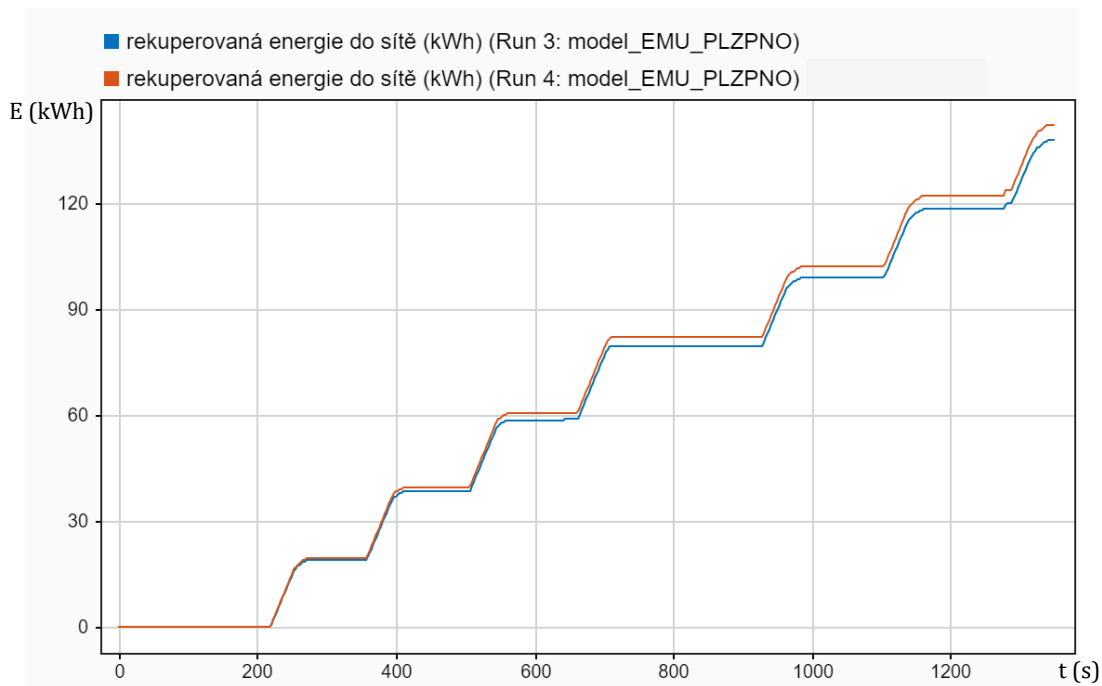
Při zaměření na rekuperaci lze vidět, že vlak rekuperuje do sítě v zimě 138 kWh. V létě je tato hodnota o 4,5 kWh vyšší.



Obr. 5-17 Průběhy proudu tekoucího z čtyřkvadrantového měniče do meziobvodu (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PLZPŇO)



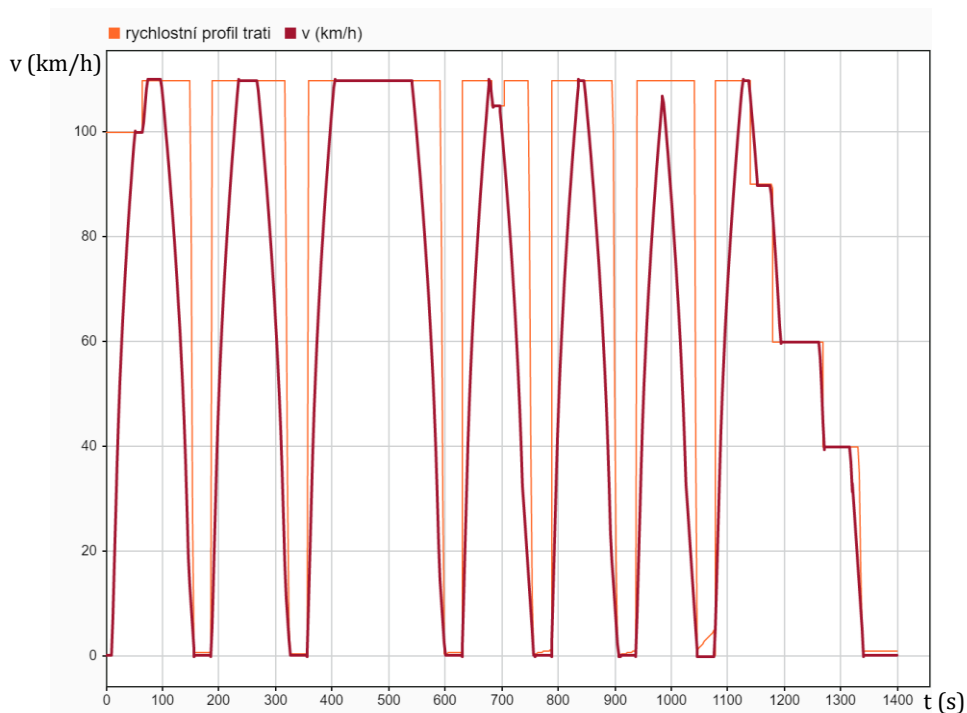
Obr. 5-18 Průběh spotřebované energie ze sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PLZPŇO)



Obr. 5-19 Průběh rekuperované energie do sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PLZPŇO)

#### 5.4.2.2 Trať Pňovany – Plzeň

Další simulací je cesta vlaku zpět do Plzně. Jelikož je tato trasa celá z kopce, musejí se brát v potaz limity elektrodynamické brzdy. Vlak tedy nedokáže zabrzdit tak rychle jako při cestě do Pňovan. Proto bylo sníženo brzdné zrychlení do stanice na  $0,9 \text{ ms}^{-2}$ . V zastávkách opět vlak stojí 30 s. Trať je tedy obrácená než v předchozím případě.



Obr. 5-20 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (EMU – PňOPLZ)

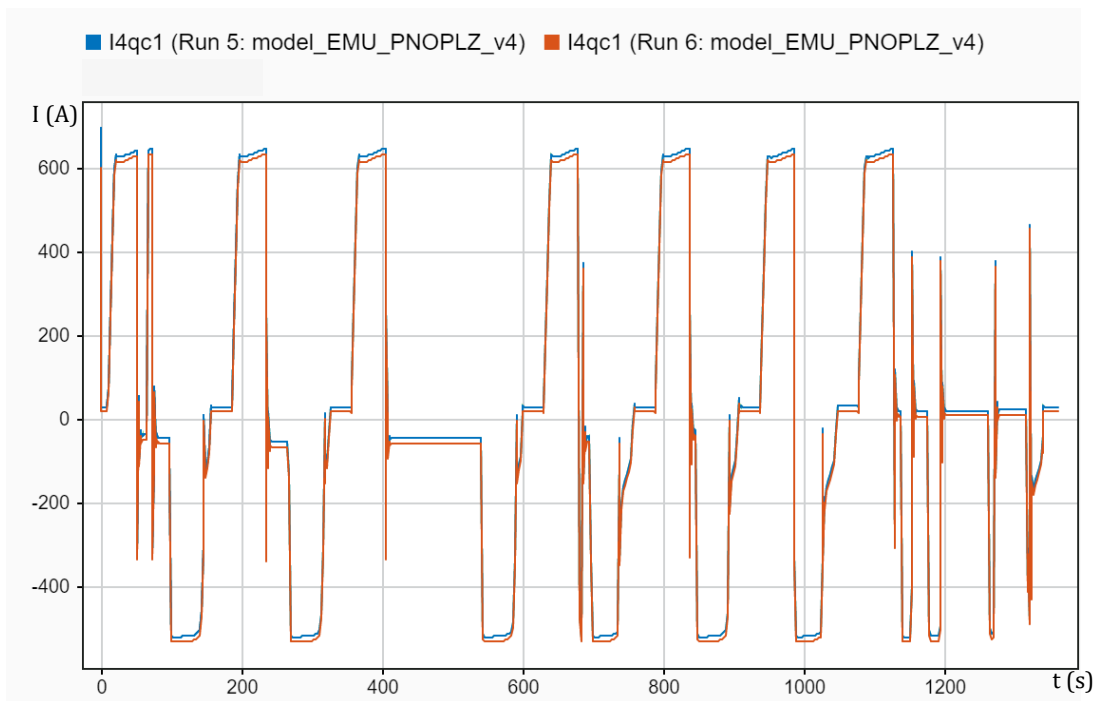
Jelikož je z této strany trať z kopce, tak liší průběhy spotřeb oproti opačnému směru. Na průbězích proudu není rozdíl na první pohled viditelný. Maximální hodnoty proudu při rozjezdech



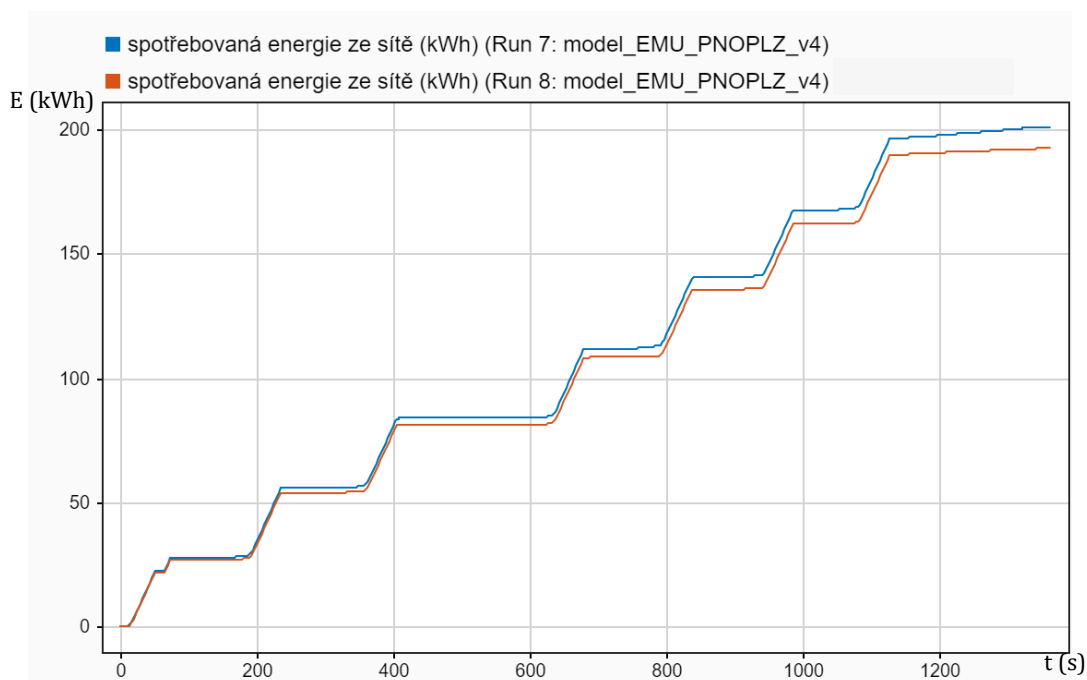
a brzdění jsou analogické jako při případě jízdy z Plzně. Modrý průběh opět odpovídá zimním obdobím a je tedy vyšší.

Na průbězích spotřeby a rekuperace jsou již vidět výraznější rozdíly oproti předchozí trati. Spotřeba je nyní v zimě 202 kWh na celou trať a v létě o 9 kWh nižší, a tedy 193 kWh. Naopak rekuperovaná energie narostla na hodnotu 170 kWh v létě a 177 kWh v zimě.

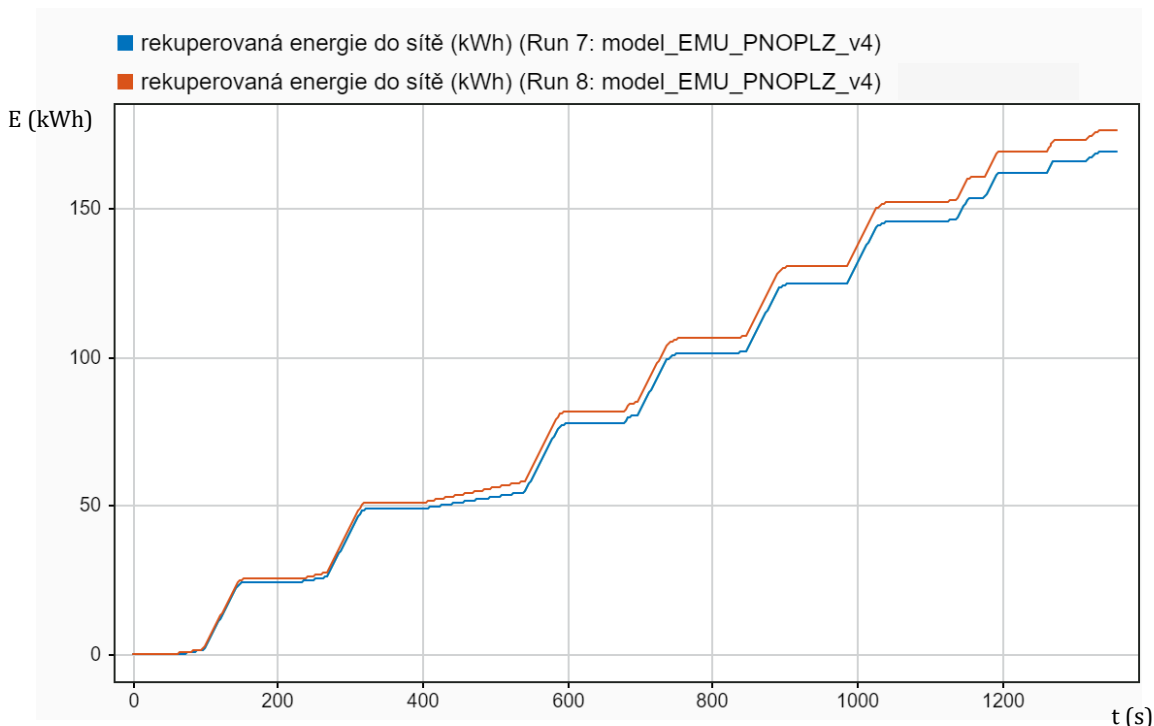
Průběhy pro tok výkonů lze najít v příloze C.6



Obr. 5-21 Průběhy proudu tekoucího z čtyřkvadrantového měniče do meziobvodu (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PŇOPLZ)



Obr. 5-22 Průběh spotřebované energie ze sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PŇOPLZ)



Obr. 5-23 Průběh rekuperované energie do sítě (zima – modrá x léto – červená) (EMU – PŇOPLZ)

### 5.4.3 Vyhodnocení průběhů

Simulace vlaku EMU slouží k porovnání nových alternativních způsobů napájení vlaku s klasickým vlakem, jaký se nyní používá na většině tratí. Předpokladem je, že tento způsob napájení by měl na elektrifikované části trati být nejúčinnější, jelikož je i komponentově nejjednodušší a budou v něm i nižší ztráty. Tento vlak ale nelze uvažovat pro pokračování z Pňovan do Bezdržic, kde trať není elektrifikována a v blízké budoucnosti ani elektrifikována nebude.

Z grafů lze vyčíst několik důležitých hodnot.

	zima		léto	
	PLZ – PŇO	PŇO – PLZ	PLZ – PŇO	PŇO – PLZ
Spotřebovaná energie	281 kWh	202 kWh	269,5 kWh	193 kWh
Rekuperovaná energie	138 kWh	170 kWh	142,5 kWh	177 kWh
Spotřebovaná energie – rekuperovaná energie	175 kWh		143 kWh	

Tabulka 2 – Důležité výsledné hodnoty průběhů EMU jednotek

V tabulce jsou vyčíslené hodnoty spotřeby pro EMU vlak. Když je od spotřebované energie odečtena hodnota rekuperované energie získáme celkovou výkonovou bilanci vlaku s trakční sítí na trati Plzeň – Pňovany – Plzeň. Průměrná spotřeba platí pro jednotlivé části trati při průměrné rychlosti na trati 60 km/h.

	zima		léto	
	PLZ – PŇO	PŇO – PLZ	PLZ – PŇO	PŇO – PLZ
Průměrná spotřeba	6,2 kWh/km	1,3 kWh/km	5,5 kWh/km	0,7 kWh/km

Tabulka 3 – Výsledné hodnoty spotřebované energie EMU jednotek

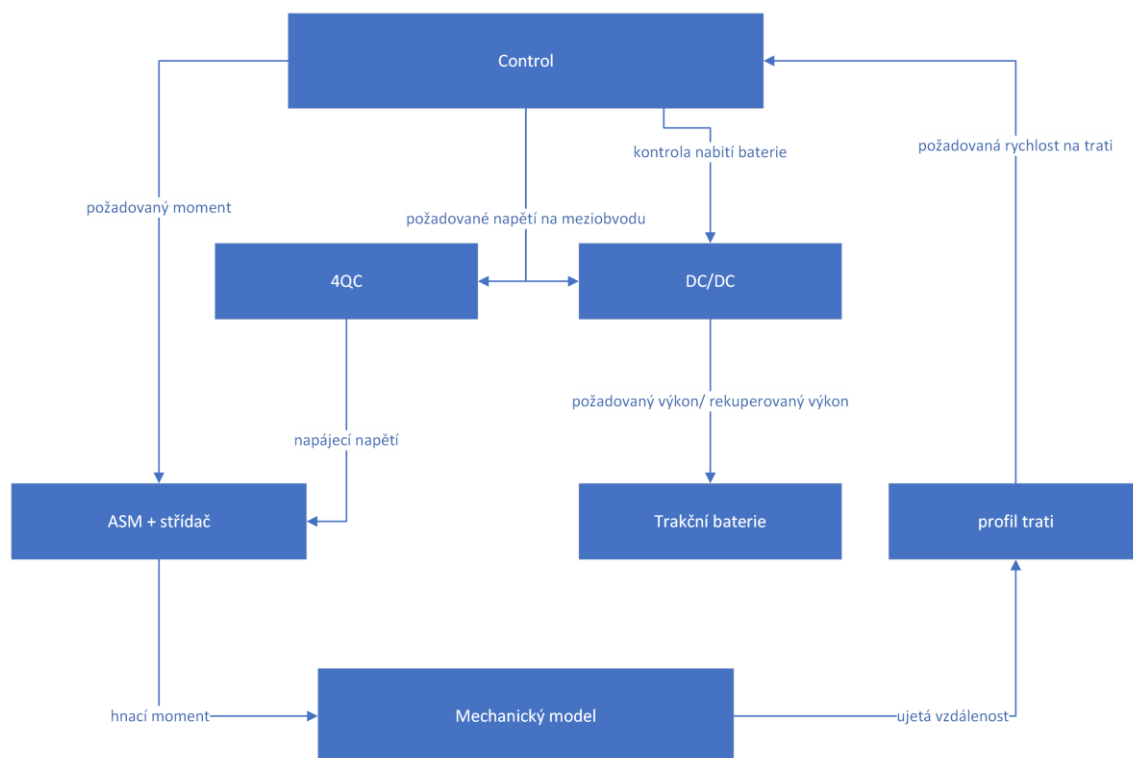
V tabulce (Tabulka 3) jsou vypsány výsledné hodnoty. Lze si povšimnout, jak velký význam hraje sklon trati a v jakém ročním období tuto trať projíždíme. Na trati z Plzně, která celá vede do kopce bude celková spotřeba mnohem vyšší. Zato na trati z kopce vlak rekuperuje do sítě natolik, že v letních měsících bude celková spotřebovaná energie ze sítě na konci jízdy do Plzně pouhých 16 kWh. Vlak z rekuperace je schopen naprosto pokrýt i vlastní spotřebu, a ještě zvládá výrazně rekuperovat do sítě. Výsledek simulace bude porovnán s vlaky BEMU na této části trati.

## 5.5 Simulace BEMU jednotky

Další simulace sleduje chování BEMU jednotky. BEMU jednotku je provozována na trati z Plzně do Bezdruzic a zpět. Zde se již nachází neelektrizovaná část trati a musí se tedy jet čistě z energie z baterie. Na této části trati se porovnávají jízdní data pouze s HEMU vlakem.

### 5.5.1 Model BEMU v SIMULINKu

Vlak BEMU vychází z jednotky EMU. Pouze jsou do meziobvodu připojeny trakční obvody z baterie. Bloky jsou opět přidány do modelu podle trakční koncepce popsané v kapitole 4.2.2. Princip simulace v SIMULINKu je tedy analogický tomu v případě EMU jednotky, ale je k němu přidán princip řízení měniče u trakční baterie.



Obr. 5-24 Schematický koncept modelu v SIMULINKu (BEMU)

Na tomto obrázku je vyobrazeno, jak tento koncept bude vypadat. Základ je stejný jako u EMU jednotky. Když vlak jede po elektrizované části trati, funguje jako EMU jednotka. Lišit se bude v tom, že baterie bude dávat signál, jak je nabitá neboli jaké má SoC („State of Charge“). Ve chvíli, kdy baterka má méně než 90 % SoC. Bude do DC/DC měniče vyslán signál pro nabíjení baterie. Ta se bude nabíjet proudem 2C (určeno kapacitou baterie jako 500 A pro každou 200 kWh baterii). Když je vlak připojen k trakčnímu vedení, trakční baterie vlaku se dobíjí rovnoměrně konstantním proudem. Nabíjecí proud je buď pokryt ze sítě, nebo při dostatečné rekuperaci také z této energie. Nabíjení baterie má vždy vyšší prioritu než rekuperace do sítě.

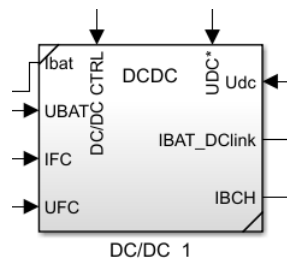
V momentě, kdy se vlak odpojí od trakčního vedení, celá zodpovědnost udržování konstantního napětí na meziobvodu padá na stejnosměrný měnič před baterií. Nyní DC/DC měnič má na starosti regulaci napětí UDC na 1600 V. Baterie vlaku se může pohybovat v rozmezí SoC 10-90 %, aby nedošlo ke zhoršení jejich vlastností při přebíjení a podbíjení. Ve chvíli, kdy je již baterie nabitá, ale vlak elektrodynamicky brzdí, pálí vygenerovanou energii v brzdovém odporu skrz proud IBCH.

Jelikož simulace vychází z EMU simulace, jsou zde popsány jen bloky, které se v předchozí simulaci nenacházely.

### 5.5.1.1 DC/DC měnič

Tento blok ovládá napájení meziobvodu z baterie, nebo naopak nabíjení baterie. Vstupují do něj signály z bloku CONTROL, a to „DC/DC\_CTRL“ a „UDC\*“. První slouží pro kontrolu funkce měniče. Měnič na elektrizované části trati bud', jak již bylo řečeno, nabíjí baterii konstantním proudem 500 A, nebo svoji funkci úplně přeruší, když SoC baterie dosáhne 90 %. Další případy jsou pak při odpojení vlaku od sítě. Vlak je v tom případě plně napájen z baterie a DC/DC měnič pomocí regulátoru reguluje napětí na meziobvodu. Veškerá energie tedy přitéká a odtéká do a z baterie. V případě, kdy se baterie vybitá na 10 %. Je napájení vlaku přerušeno. V dalším případě, kdy vlak bude mít SoC 90 % a bude potřebovat rekuperovat, bude se energie pálit v brzdovém odporu pomocí IBCH.

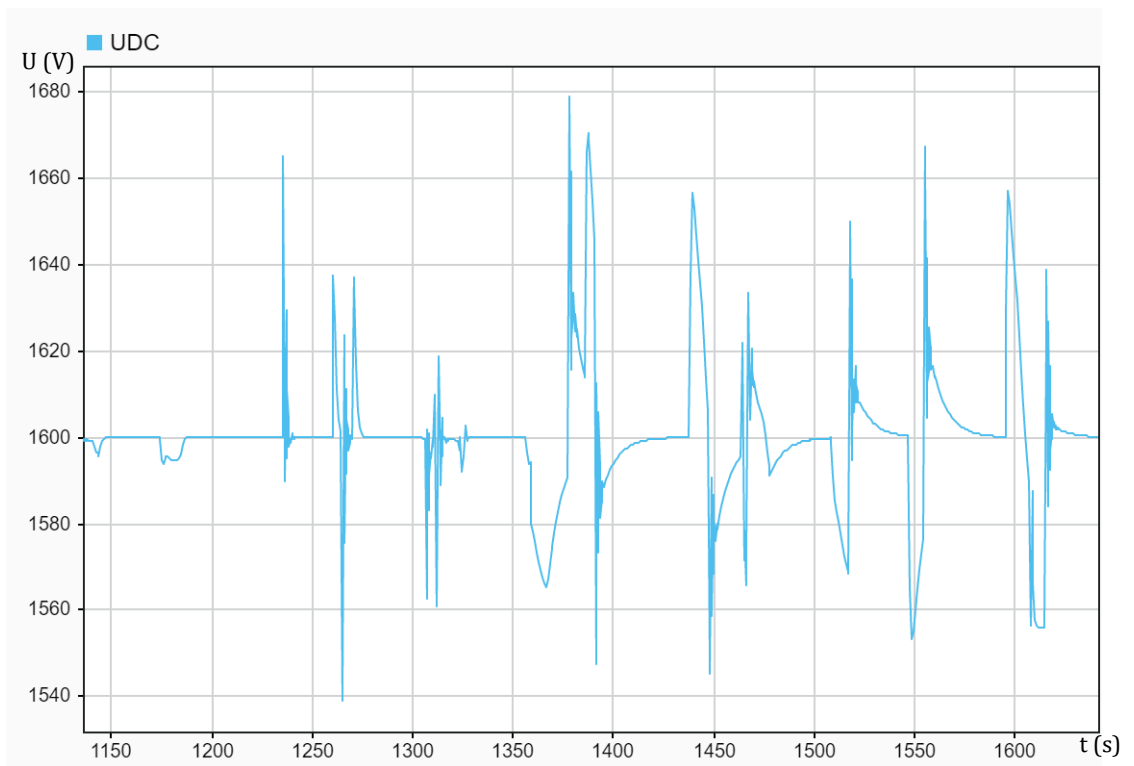
Do bloku také vstupuje napětí a proud s označením „FC“. Ty jsou připraveny pro další simulaci vodíkového vlaku, kde tyto vstupy budou použity pro palivový článek („Fuel Cell“).



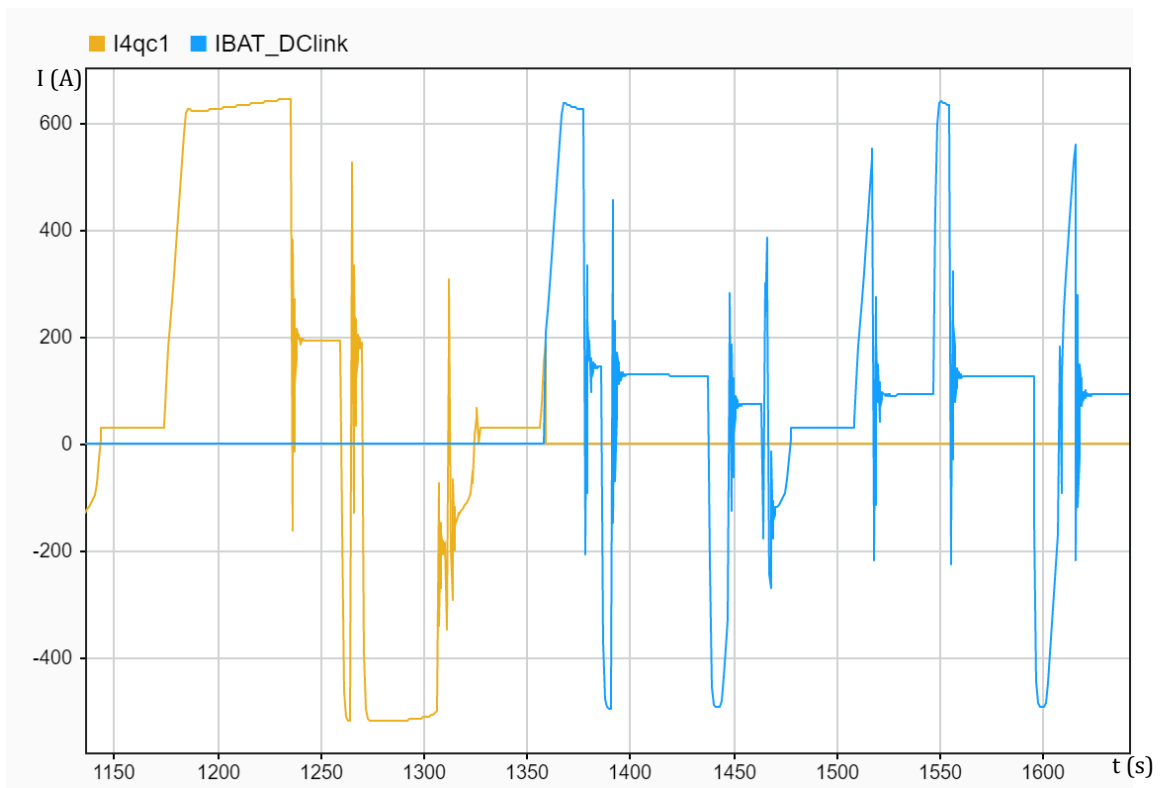
Obr. 5-25 Blok DC/DC měniče

Na obrázcích jsou vykresleny průběhy regulace napětí na meziobvodu, když DC/DC měnič převezme kontrolu poté, co vlak sjede z elektrifikované části trati. Na průbězích lze vidět, jak meziobvod přestoupí z napájení ze sítě na napájení z baterie v čase 1385 s. Napětí začne více kolísat. To je z důvodů, že trať je od Pňovan do Bezdržic více náročná na brzdění a zrychlování. Jsou zde krátké úseky mezi zastávkami a rychle se mění rychlostní limity. Dalším důvodem je, že z baterie se odebírá výkon na úrovni nižšího napětí. Proud tedy musí být vyšší, aby se vyrovnal požadavku na výkon z baterie. Proud je ale omezen na 4C, aby se předešlo rychlejší degradaci baterie.

Na obrázku 5-27 jsou vyobrazeny průběhy odpovídajících si proudů. Jeden proud je tedy ze čtyřkvadrantového měniče do meziobvodu a proud „IBAT\_DClink“, který představuje proud tekoucí z DC/DC měniče do meziobvodu. V této variantě simulace byla baterie nabitá na 90 % před přechodem z elektrifikované části na neelektrifikovanou, a proto je proud „IBAT\_DClink“ do té chvíle nulový.



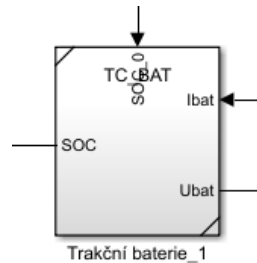
Obr. 5-26 Regulace napětí na meziobvodu BEMU



Obr. 5-27 Průběhy proudů napájecích meziobvod BEMU

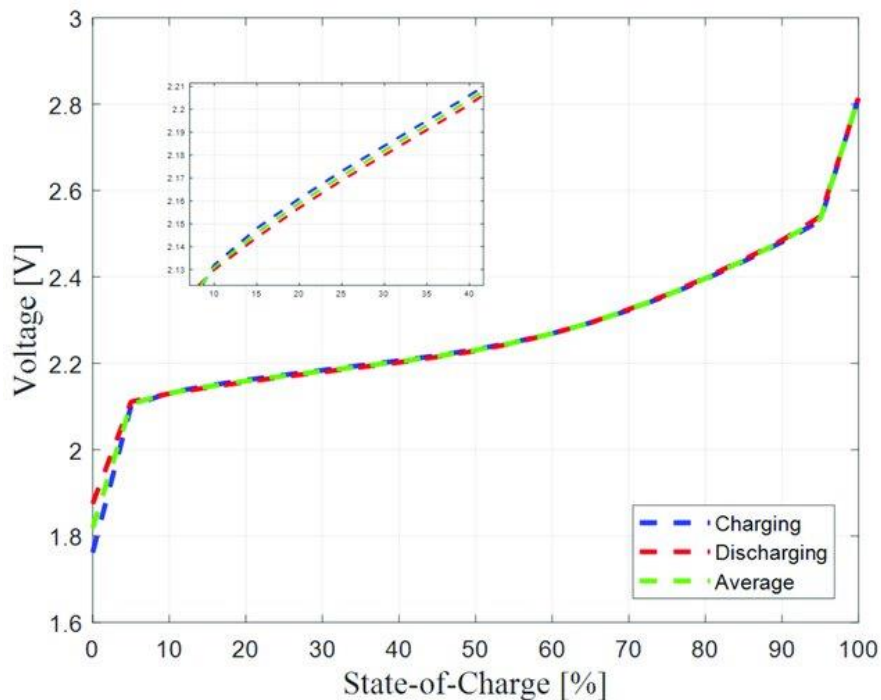
### 5.5.1.2 Trakční baterie

Zdrojem energie pro BEMU je kromě trakční sítě i trakční baterie. Tento blok představuje funkci LTO baterie ve vlaku. Jedna baterie má kapacitu 200 kWh. Dohromady má tedy vlak energickou kapacitu 400 kWh. Toto je typická hodnota, kterou výrobci pro tento model vlaku používají. S touto hodnotou se dá pro účely simulace manipulovat.



Obr. 5-28 Blok trakční baterie

Jmenovité napětí baterie je 800 V. Toto napětí se ale snižuje s vnitřním odporem baterie a SoC baterie. Vnitřní odpor je určen jako 100 mΩ. Nabíjecí a vybíjecí charakteristika je určena jako typická charakteristika pro LTO baterie. Na obrázku Obr. 5-29 je vyobrazeno, jak tento průběh vypadá. Poměrově tedy 100 % napětí na baterii je pouze při 100 % nabití. Jakmile se baterie trochu vybijí spadne napětí na 90 % a dál lineárně klesá až do bodu, kdy na baterii bude 5 % SoC. V tu chvíli napětí klesne na 64 % jmenovitého. Baterie je v simulaci pojištěna tak, že se bude pohybovat pouze mezi 10 a 90 % SoC. Na extrémní charakteristiky se tedy model nedostane.



Obr. 5-29 Nabíjecí a vybíjecí charakteristika [30]

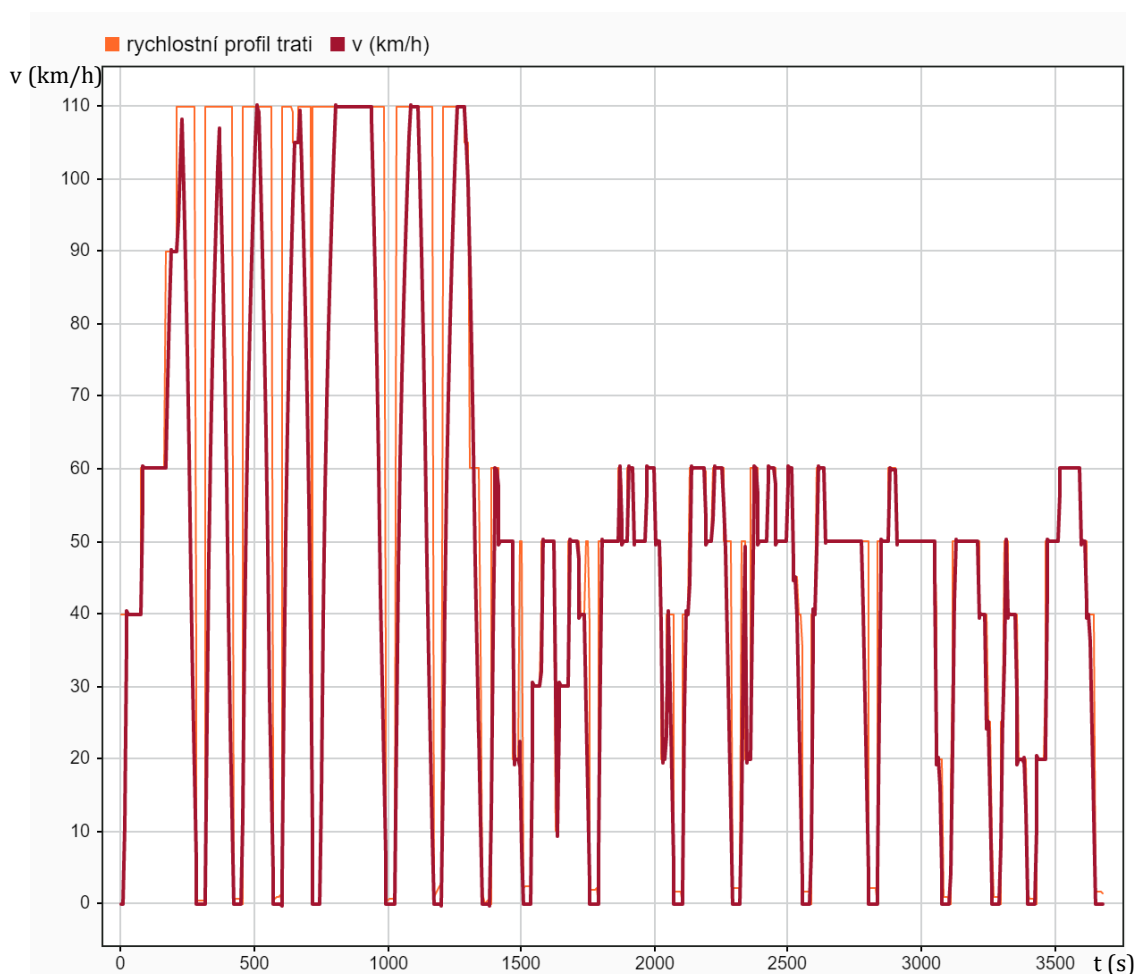
Vstupním signálem do bloku trakční baterie je tedy pouze stav nabití baterie na začátku simulace. Tímto parametrem lze výrazně ovlivnit výsledek simulace zejména spotřeby vlaku, která bude záviset na tom, jestli a jak moc se bude baterie muset ještě ze sítě nabíjet. Jak model vypadá lze nalézt v příloze B.4.

## 5.5.2 Důležité výsledné průběhy na tratích BEMU

Pro BEMU jednotku už je uvažována na rozdíl od EMU celá trať z Plzně až do Bezdržic. V části trati Pňovany – Bezdržice se napájí vlak čistě z baterie. Pro simulaci zpáteční cesty je předpokladem, že SoC baterie, s jakým vlak přijede, se bude rovnat SoC při odjezdu, tedy, že se vlak v konečné stanici nedobíjí.

### 5.5.2.1 Trať Plzeň – Bezdržice

Jako první je simulována trať směrem z Plzně do Bezdržic. Téměř celá tato trať vede do kopce, takže i tomuto bude odpovídat měřená spotřeba. Po Pňovanech se výrazně snižuje maximální povolená rychlost na 60 km/h. Na úseku jsou kromě zastávek také výrazná rychlostní omezení. V některých případech není vlak schopen maximální rychlosti dosáhnout, aby stihl zastavit do další zastávky.

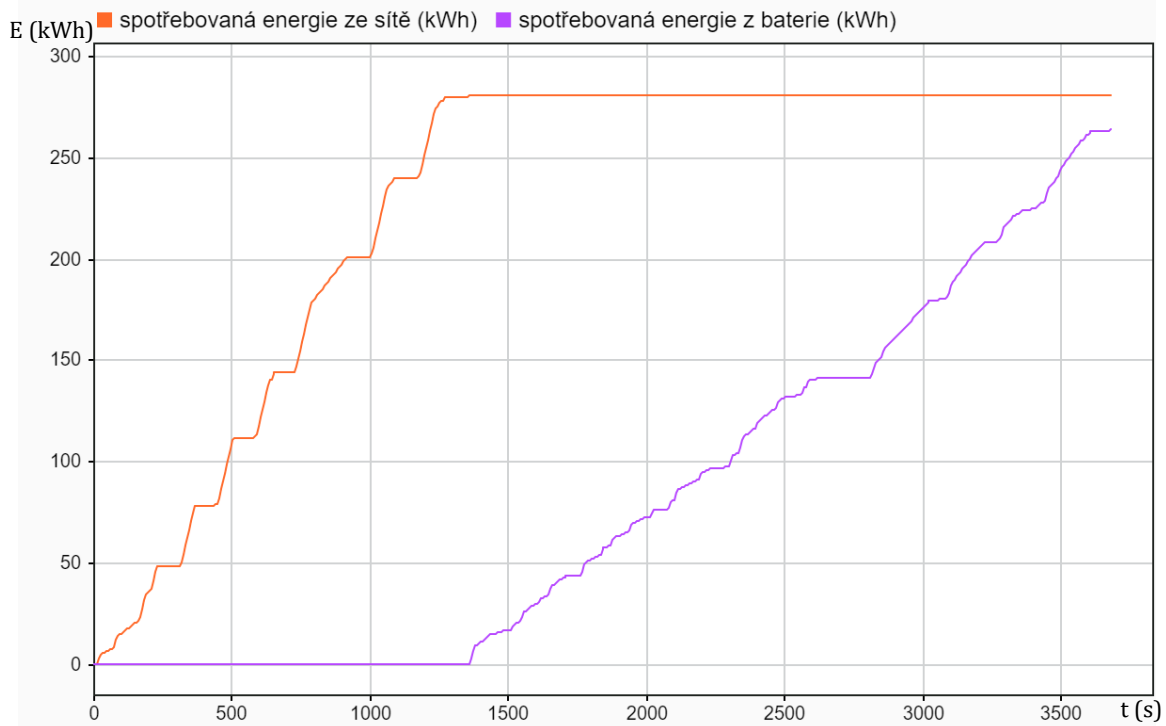


Obr. 5-30 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (BEMU – PLZ-BEZ)

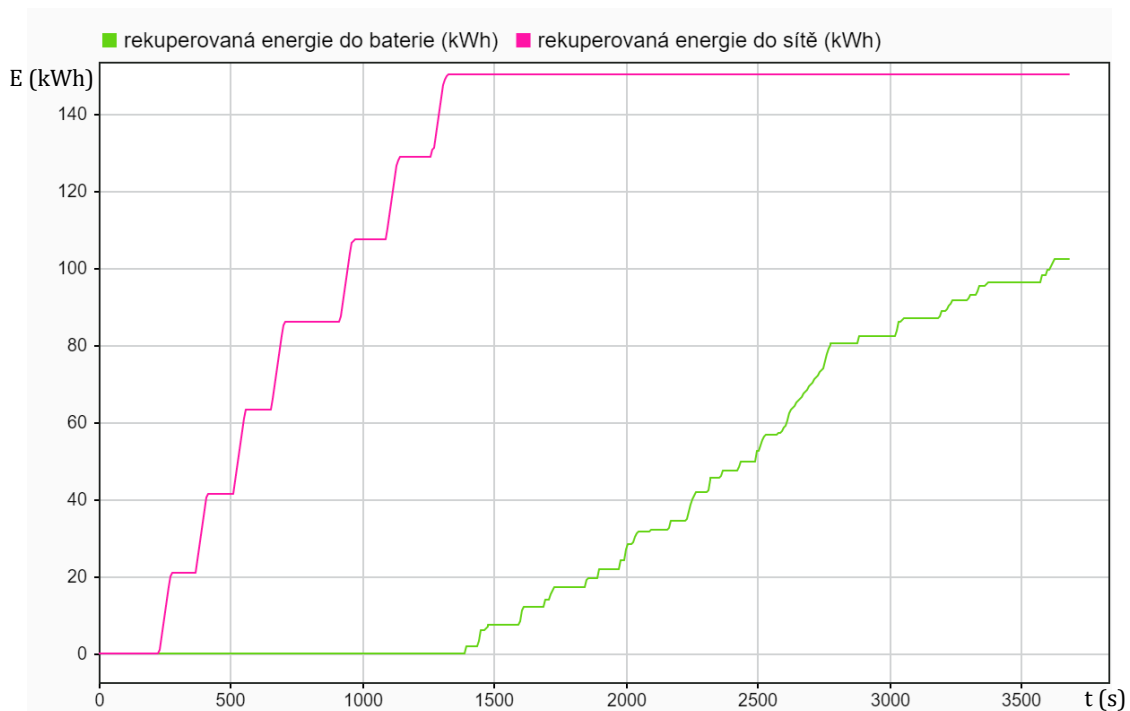
V simulaci je počáteční podmínkou, že vlak vyjel ze stanice Plzeň s baterií nabitou na 90 % pro lepší porovnání EMU a BEMU vlaku na trati Plzeň – Pňovany. Po výjezdu z Pňovan vlak funguje bez trakčního vedení a je napájen proudem z DC/DC měniče a trakční baterie.

Na obrázku Obr. 5-31 a Obr. 5-32 je vyobrazena spotřeba a rekuperace BEMU vlaku na trati Plzeň – Bezdržice v letních měsících. V zimních měsících by byly průběhy analogické, ale zvýšené o hodnotu vlastní spotřeby. Na prvním z grafů jsou dva průběhy. První odpovídá spotřebované energii ze sítě. Data z tohoto průběhu jsou použita pro srovnání celkových spotřeb vlaků EMU, BEMU a HEMU. Druhý průběh zobrazuje spotřebu energie, která je na zbytku trati z Pňovan do Bezdržic čerpána z baterie. Tuto energii je poté nutno dobít do baterie na zpáteční cestě do Plzně.

Je vidět, že spotřeba energie ze sítě má prudší stoupání. To je z důvodu, že první část trati má mnohem vyšší povolené rychlosti a je potřeba čerpat více energie ze sítě pro pohon. Celková spotřebovaná energie ze sítě odpovídá 280,5 kWh v letních měsících a 292,2 kWh v zimních. Na zbytku trati bylo spotřebováno z baterie zhruba 265 kWh v létě a 285 kWh v zimě.



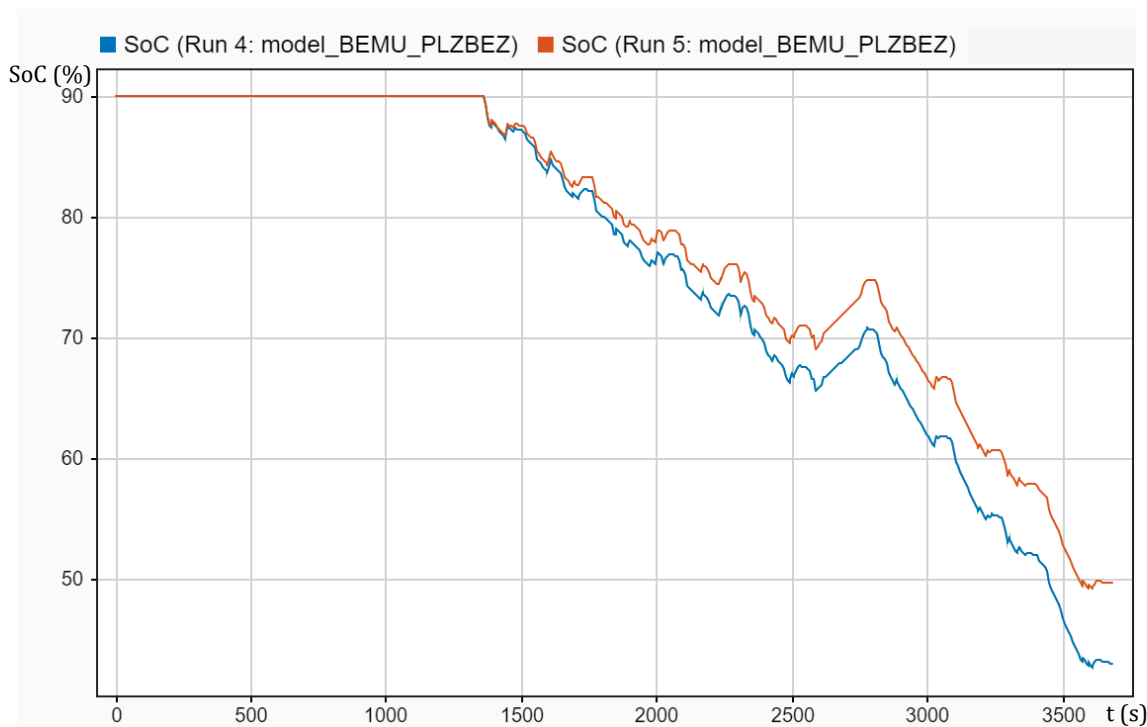
Obr. 5-31 Průběhy spotřeby v letních měsících (BEMU – PLZBEZ)



Obr. 5-32 Průběhy rekuperované energie v letních měsících (BEMU – PLZBEZ)



Co se týče rekuperace, větší energii je dodána v části s vysokými rychlostmi. Na zbytku trasy je rekuperováno jen nižší množství energie, protože je trať značně do kopce. Na trase do Pňovan to je 151 kWh v letních měsících a 146,5 kWh v zimních. Dále na zbytku tratě v létě je do baterie rekuperováno 105 kWh a v zimě 97 kWh.



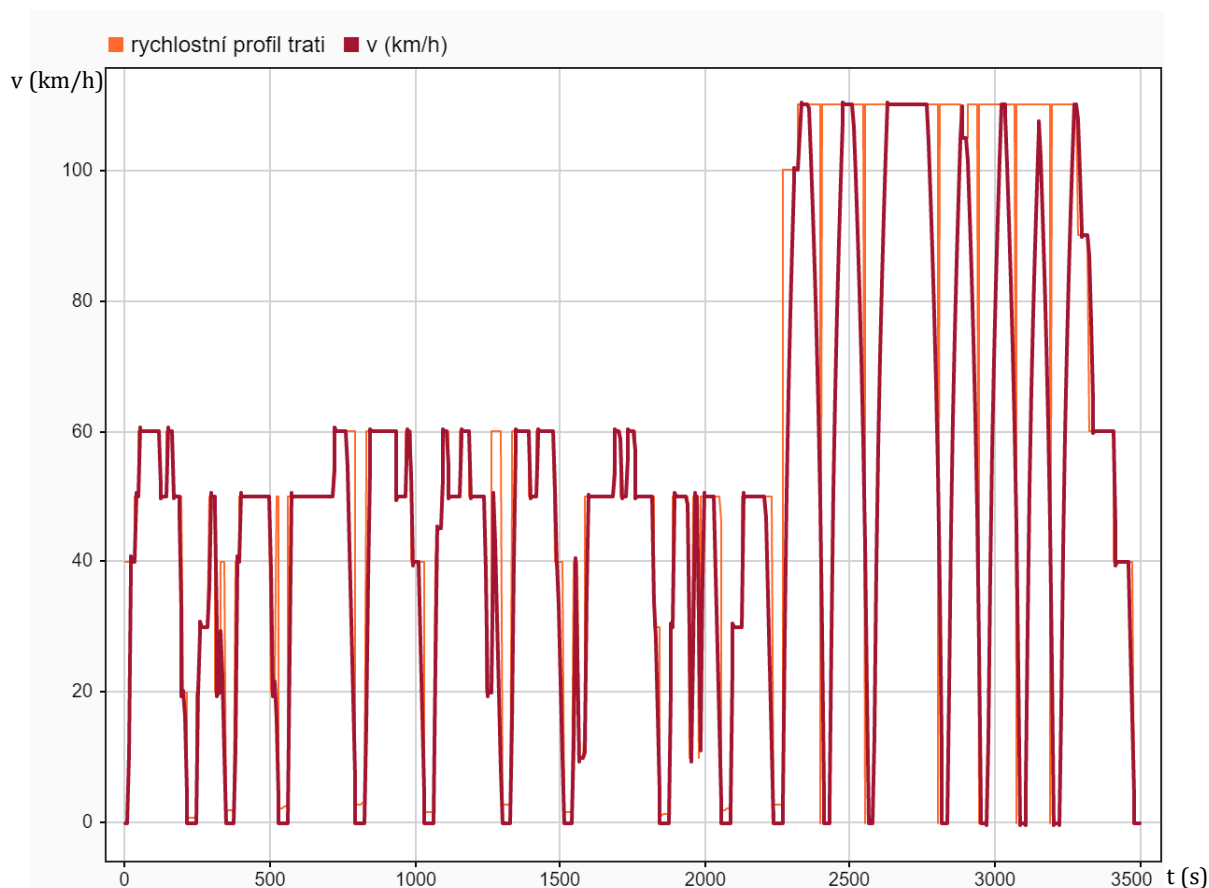
Obr. 5-33 Průběh SoC trakční baterie (zima – modrá x léto – červená) (BEMU – PLZBEZ)

Na posledním průběhu Obr. 5-33 vidíme, jak vypadá „State of Charge“ baterie po celou jízdu opět v létě a v zimě. V zimě tato trasa stojí 46,9 % baterie a v létě 40,2 %. Tyto hodnoty jsou použity pro zpáteční cestu do Plzně jako počáteční podmínky pro simulaci.

### 5.5.2.2 Trať Bezručice – Plzeň

Následně je trať simulována s danými počátečními podmínkami zpět do Plzně. Pro obě roční období se tedy začíná s jiným SoC při výjezdu ze stanice Bezručice. Po napojení na trakční síť pomocí rekuperace a energie ze sítě se baterie nabíjí zpět na 90 % SoC. Tím je zjištěna celková energická bilance na trase do Bezručic a zpět.

Tento úsek je z většiny výrazně z kopce. Lze tedy předpokládat, že zde bude vysoká rekuperovaná energie. Opět platí stejné předpoklady jako u předchozí simulace.



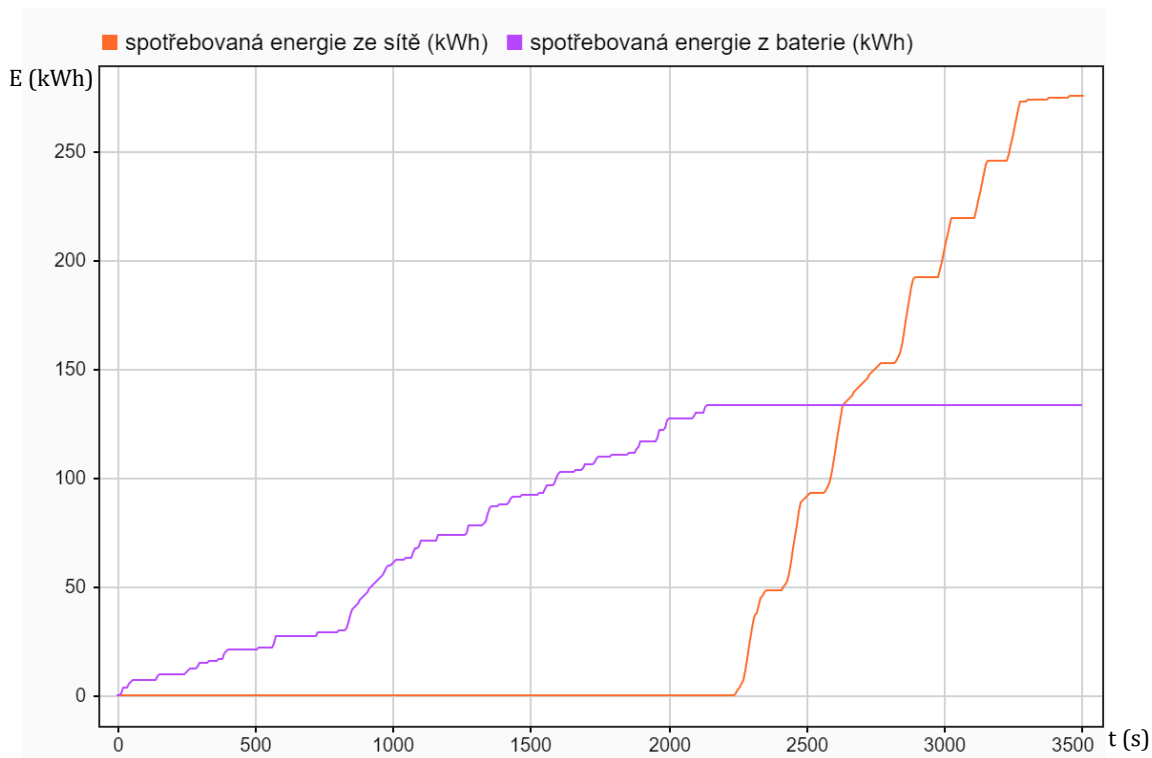
Obr. 5-34 Průběh reálné rychlosti vlaku a rychlostních limitů tratě (BEMU – BEZPLZ)

Na obrázku Obr. 5-35 jsou vyobrazeny spotřeby vlaku. Je zřejmé, že jelikož v první části trati jede vlak z kopce, spotřeba vlaku narůstá celkem pomalu. Jakmile vlak najede na část trati napájenou z trakční sítě, stoupne skokově spotřeba. To je tím, že vlak okamžitě začne dobíjet baterii zpět na 90 %. K normální spotřebě vlaku se tedy přidává i energie pro dobíjení baterie. Celková spotřeba ze sítě v Plzni tedy je 317,5 kWh v zimě a 276 kWh v létě.

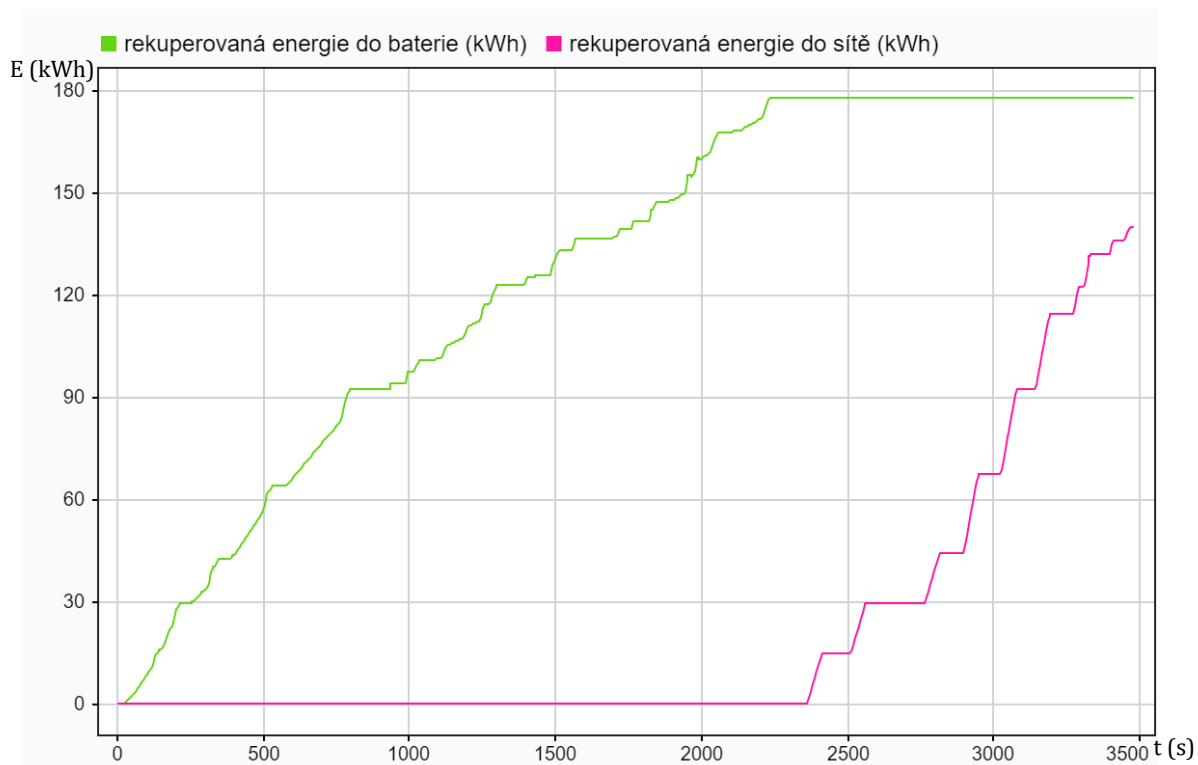
Na obrázku Obr. 5-36 lze vidět, že díky vysokému sklonu trati dolů na začátku trati, dokonce vlak rekuperuje víc energie, než spotřebovává, a proto v prvních kilometrech trati dosahuje baterie i o několik procent více než na počátku simulace. Jakmile jednotka najíždí na trakční síť, počítá se jako rekuperovaná energií ta, co se vrací do sítě. Zbytek energie je použit na dobíjení baterie. Z toho důvodu se z grafu zdá, že vlak jednu chvíli vůbec nerecuperuje. Vlak skutečně energii vyrábí, ale ta putuje právě do trakční baterie. Vlak je v létě schopen rekuperovat hodnotu 135 kWh a v zimě 108 kWh.

Na posledním vyobrazeném grafu je průběh SoC baterie, z těchto grafů vyplývají vysoké rozdíly mezi spotřebou v létě a v zimě. Vlak totiž už na začátku nezačíná se stejnými podmínkami, a to proto, že se řídí výsledky simulace pro Plzeň-Bezručice. Jak bylo dříve popsáno, baterie se zpočátku díky rekuperaci nabíjí. Poté lehce kolísá, ale díky sklonu trati vlak dojíždí do Pňovan s vyšší hodnotou SoC než vyjížděl z Bezručice. Poté se vlak napojuje na trakční síť a baterie se dobíjí. Pro zimní měsíce je potřeba dobít mnohem vyšší energii, a proto výsledné spotřeby vlaku jsou tak odlišné. SoC baterie se ustálí v Pňovanech v zimě na 46,7 % a v létě na 59,8 %.

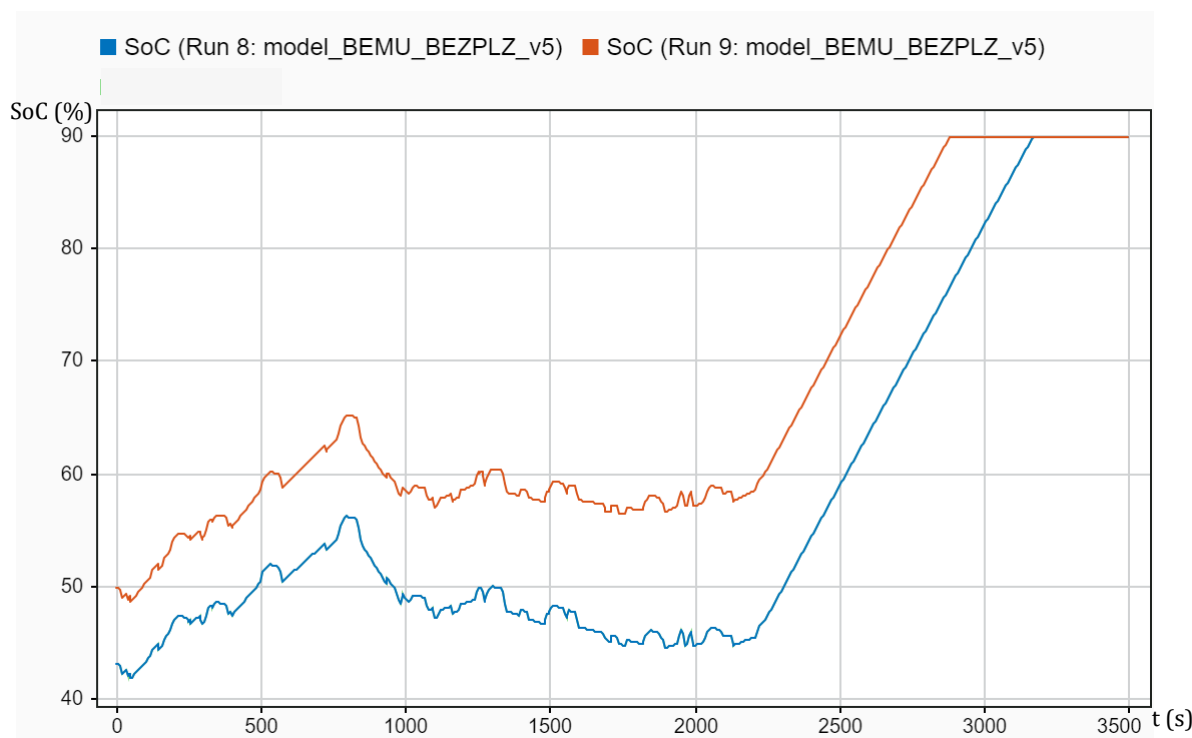
Více průběhů lze nalézt v příloze C.7.



Obr. 5-35 Průběhy spotřeby v letních měsících (BEMU – BEZPLZ)



Obr. 5-36 Průběhy rekuperované energie v letních měsících (BEMU – BEZPLZ)



Obr. 5-37 Průběh SoC trakční baterie (zima – modrá x léto – červená) (BEMU – BEZPLZ)

### 5.5.3 Vyhodnocení průběhů BEMU

Jako první budou vyhodnoceny výsledky pro část trati z Plzně do Pňovan. Tyto výsledky jsou poté použity pro porovnání EMU jednotky s jednotkou bateriovou. Zbytek tratě slouží jako porovnání BEMU a HEMU jednotek.

	zima		léto	
	PLZ – PŇO	PŇO – PLZ	PLZ – PŇO	PŇO – PLZ
Spotřebovaná energie ze sítě	292,5 kWh	199 kWh	280,5 kWh	192 kWh
Rekuperovaná energie do sítě	146,5 kWh	168,5 kWh	151 kWh	175,5 kWh
Spotřeba – rekuperace	146 kWh	30,5 kWh	129,5 kWh	16,5 kWh
Průměrná spotřeba	6,34 kWh/km	1,33 kWh/km	5,63 kWh/km	0,72 kWh/km

Tabulka 4 – Hodnoty pro trať PLZ – PŇO (BEMU)

Z tabulky (Tabulka 4) lze vyčíst, že mezi létem a zimou je opět velice podobný rozdíl jako u vlaků EMU. Vlak na části trati z Plzně do Pňovan spotřebuje v zimě 292,5 kWh a v létě o 12 kWh méně. Naopak, co se týče rekuperované energie v zimě bude hodnota nižší o 4,5 kWh než v létě. V opačném směru vlak spotřebuje 199 kWh v zimě a 192 kWh v létě.

V následující tabulce jsou již celkové výsledky pro celý průběh trati z Plzně do Bezdržic a zpět. Pro trať z Plzně je uvažována plně nabitá baterie, a tedy ze sítě již nemusí odebírat energii na nabíjení baterie, proto hodnoty v tabulkách odpovídají čisté spotřebě vlaku pro jízdu a pro pomocné pohony. Procento nabití baterie je poté použito jako počáteční podmínka pro zpáteční cestu. Toto procento se liší pro letní a zimní měsíce.

Pro zpáteční cestu bude uvažováno, že se vlak po napojení na trakční síť nabije zpět na 90 %. Proto bude na zpáteční cestě spotřeba mnohem vyšší než na cestě do Bezdrůžic. Zásadní pro vyhodnocení tedy budou data pro celou trať do Bezdrůžic a zpět.

	zima		léto	
	PLZ – BEZ	BEZ – PLZ	PLZ – BEZ	BEZ – PLZ
Spotřebovaná energie ze sítě	292,5 kWh	317,5 kWh	280,5 kWh	276 kWh
Rekuperovaná energie do sítě	146,5 kWh	108 kWh	151 kWh	135 kWh
Spotřeba – rekuperace	355,5 kWh		270 kWh	
Průměrná spotřeba PLZ–BEZ–PLZ	3,78 kWh/km		2,87 kWh/km	

Tabulka 5 – Výsledné hodnoty spotřebované energie BEMU jednotek

Z tabulky lze vyčíst, že jsou rozdíly mezi létem a zimou podstatné. Druhý velký rozdíl spočívá ve sklonu trati. Trať ve směru z Plzně do Bezdrůžic má téměř celá sklon do kopce. Proto jsou hodnoty spotřeby na trati do Bezdrůžic o tolik vyšší. Cestou zpět jede vlak z kopce, a to pomáhá při rozjezdu i při udržování rychlosti.

SoC	Zima	Léto
Plzeň	90 %	90 %
Bezdrůžice	43,1 %	49,8 %
Pňovany	46,7 %	59,8 %
Plzeň	90 %	90 %

Tabulka 6 – Stav nabití baterie na průběhu trati BEMU

Z tabulky (Tabulka 6) je vidět, jak efektivní je právě BEMU jednotka pro jízdu z kopce. Z Plzně do Bezdrůžic spotřebuje 46,9 % baterie (187,6 kWh) v zimě a v létě 40,2 % baterie (160,8 kWh). Z kopce se ale dokonce baterie dobije v zimě o 3,6 % (14,4 kWh) a v létě o celých 10 % (40 kWh).

Vyvstává zde otázka, zda vlak nemá předimenzovanou baterii. Proto kapacita baterie bude snížena na polovinu a v následující tabulce dostaneme hodnoty nové. Nová kapacita baterie tedy je 200 kWh a hmotnost vlaku bude o 4,5 tun nižší. Tím by se ušetřili náklady na výrobu vlaku. Po simulaci tohoto případu bylo, ale zjištěno, že v případě zimních měsíců, baterie na dojezd do stanice Bezdrůžice nestačí. Vlak by se musel otočit o stanici dříve. Ani v letních měsících do stanice nedorazí.

	Zima	Léto
Dojezd vlaku s poloviční baterií (směr Plzeň – Bezdrůžice)	44,5 km	46,1 km

Tabulka 7 – Dojezd vlaku s menší baterií (kapacita baterie 200 kWh)

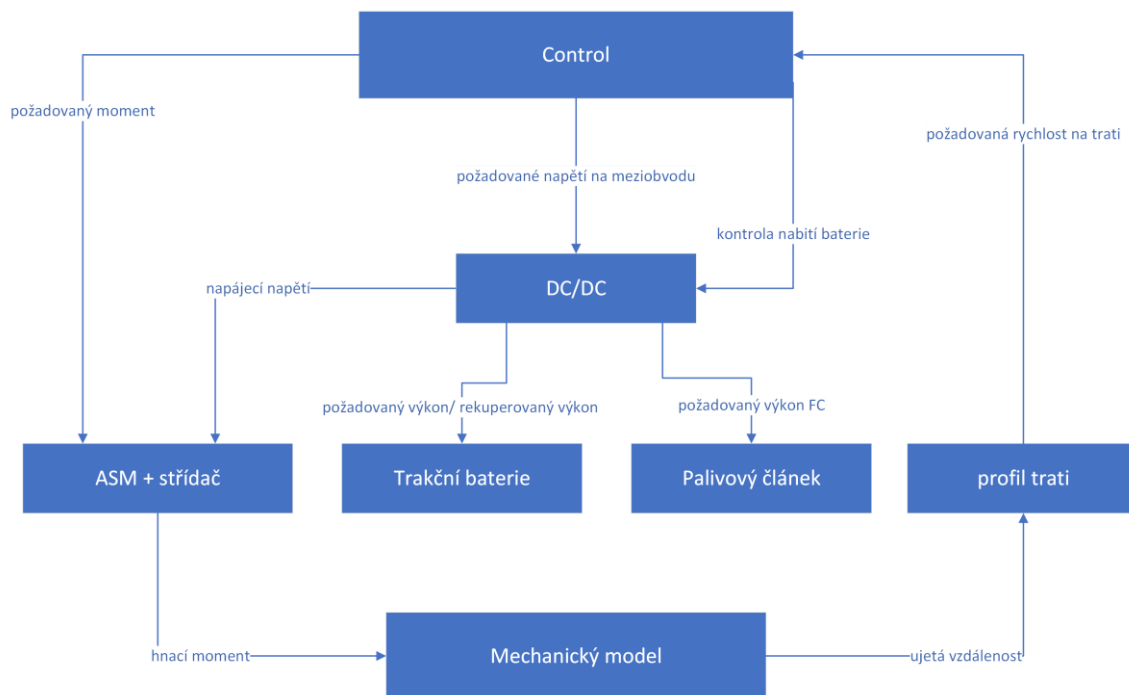
Z tohoto vyplývá, že baterie je dimenzována správně. I kdyby vlak do stanice dojel, hlavní nevýhodou menší baterie je rychlejší cyklení, nabíjení a vybíjení baterie a v důsledku toho se sníží její životnost. Také nebude existovat energetická rezerva pro případ, že by bylo potřeba zajistit napájení vlaku po dobu výluky. Tedy závěrem je, že do vlaku se nevyplatí dávat menší baterii.

## 5.6 Simulace HEMU jednotky

Posledním simulovaným vlakem je vlak napájený z vodíkového článku. Ten je přímo porovnán s bateriovým vlakem na celé délce trasy.

### 5.6.1 Model HEMU v SIMULINKu

Model vodíkového vlaku vychází z části modelu bateriového vlaku. Podle trakčního konceptu v kapitole 4.3.1 je tedy vytvořena simulace, která oproti BEMU vlaku má do DC/DC měniče napojený i výstup z palivového článku, který přeměňuje vodík na elektrickou energii.



Obr. 5-38 Schematický koncept modelu v SIMULINKu (HEMU)

Ze schématu je vidět, že koncept se od předchozích dvou vlaků výrazně liší, a to tím, že úplně postrádá připojení k trakční síti. Ve vlaku není ani transformátor ani čtyřkvadrantový měnič zajišťující napájení ze sítě. Napájení meziobvodu na celé délce trati zajišťuje DC/DC měnič. Vlak je tedy napájen z trakční baterie a z palivového článku. Problémem palivového článku je jeho pomalá regulace. Nelze tedy napájet vlak jenom z něj. Palivový článek primárně napájí trakční baterii, která stačí, aby byla pouze poloviční oproti BEMU jednotce. Ta poté zajišťuje plynulou regulaci napájení meziobvodu pro napájení trakčních motorů. Přebytek energie, který meziobvod nespotebuje, ukládáme právě do trakční baterie.

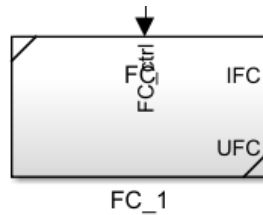
Palivový článek je regulován na 5 stupňů (0, 25, 50, 75, 100 % výkonu). Jakmile se vlak blíží k plnému nabití baterie, je pomalu omezován výkon tohoto článku, aby se nikdy nepřesáhlo 90 % SoC.

Princip řízení vlaku je analogický jako v předchozích případech, proto jsou zde popsány pouze části, které se v předchozích simulacích nenacházely.

Jak model vypadá lze nalézt v příloze B.5.

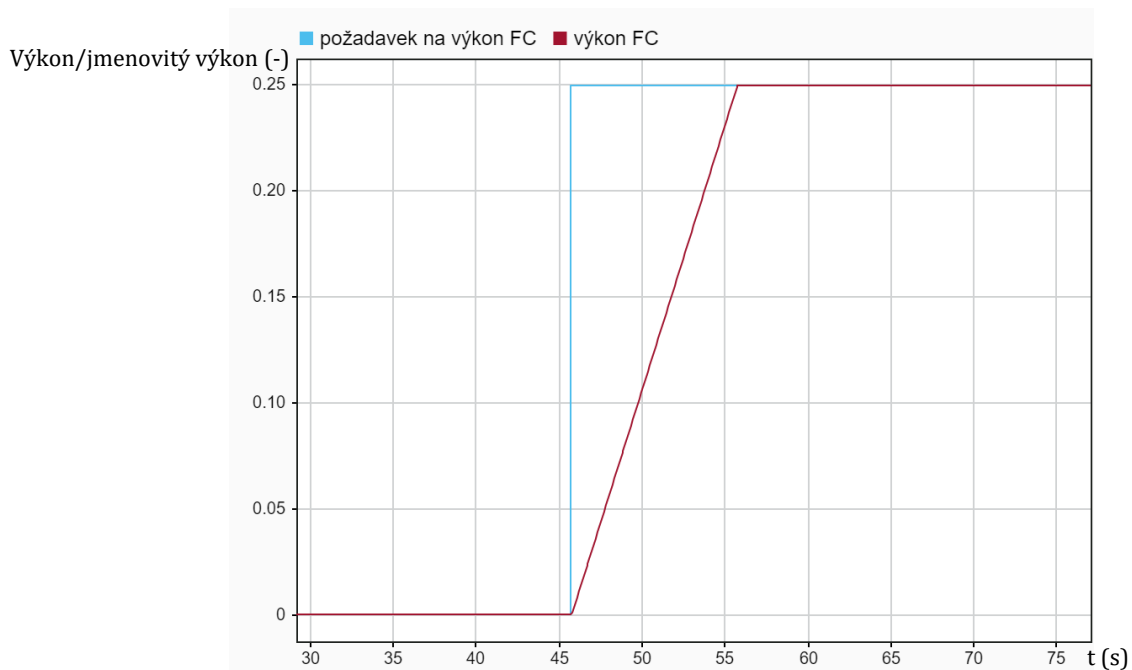
#### 5.6.1.1 Palivový článek (FC)

Novým blokem této simulace je palivový článek. Tento blok simuluje přeměnu vodíku na elektrickou energii. Jmenovitý výkon tohoto bloku je 100 kW. Podle požadavku na výkon přicházející z bloku CONTROL se tento výkon reguluje na stupně, které byly již výše popsány.



Obr. 5-39 Blok palivového článku

Princip je tedy následující. Z palivového článku vychází proměnný výkon s konstantním napětím. Měnit se tedy bude výstupní proud, který bude vstupovat do bloku DC/DC měniče. Pokud tento proud bude vyšší než proud požadovaný pro udržení požadovaného napětí na meziobvodu, bude se zbytkem energie dobíjet trakční baterie. Ve chvíli, kdy se baterie začne přibližovat k 90 % SoC baterie, bude se postupně omezovat výkon palivového článku. Když bude SoC pod 75 %, bude palivový článek dodávat 100 % výkonu (100 kW). Jakmile stoupne SoC nad tuto hodnotu výkon je omezen na 75 %. Nad 80 % SoC je to 50 % výkonu až do 85 %, kde se výkon omezí na pouhých 25 %. Nad 89 % se již palivový článek vypíná.



Obr. 5-40 Průběh regulace výkonu palivového článku

Na grafu výše je demonstrována regulace vodíkového článku. Vidíme, že než článek dosáhne požadovaného výkonu, tak to trvá zhruba 10 s. To je v kontextu regulace napětí na meziobvodu velmi pomalé. Proto se v trakčním obvodu nachází i trakční baterie.

### 5.6.1.2 Trakční baterie

Trakční baterie je analogická k baterii u BEMU vlaku. Jedná se o LTO technologii, která má ale oproti BEMU vlaku poloviční kapacitu. Také je napájena nejen rekuperací ale i energií z palivového článku.

### 5.6.1.3 Výpočet spotřeby vodíku a energie

Při zaměření na spotřebu energie, nemůžeme u HEMU jednotky opomenout kolik vodíku je potřeba pro výrobu energie, kterou vlak spotřebuje. Opravdová spotřeba vlaku je tedy energie potřebná pro výrobu tohoto množství vodíku. Jelikož není jeho účinnost stoprocentní je třeba také počítat s těmito hodnotami.

Energie pro výrobu a uložení 1 kg vodíku [31]	50 kWh
Energetická hustota vodíku [32]	39,3 kWh/kg
Účinnost palivového článku [33]	60 %

Tabulka 8 – Údaje pro výrobu energie z vodíku

## 5.6.2 Důležité výsledné průběhy na tratích HEMU

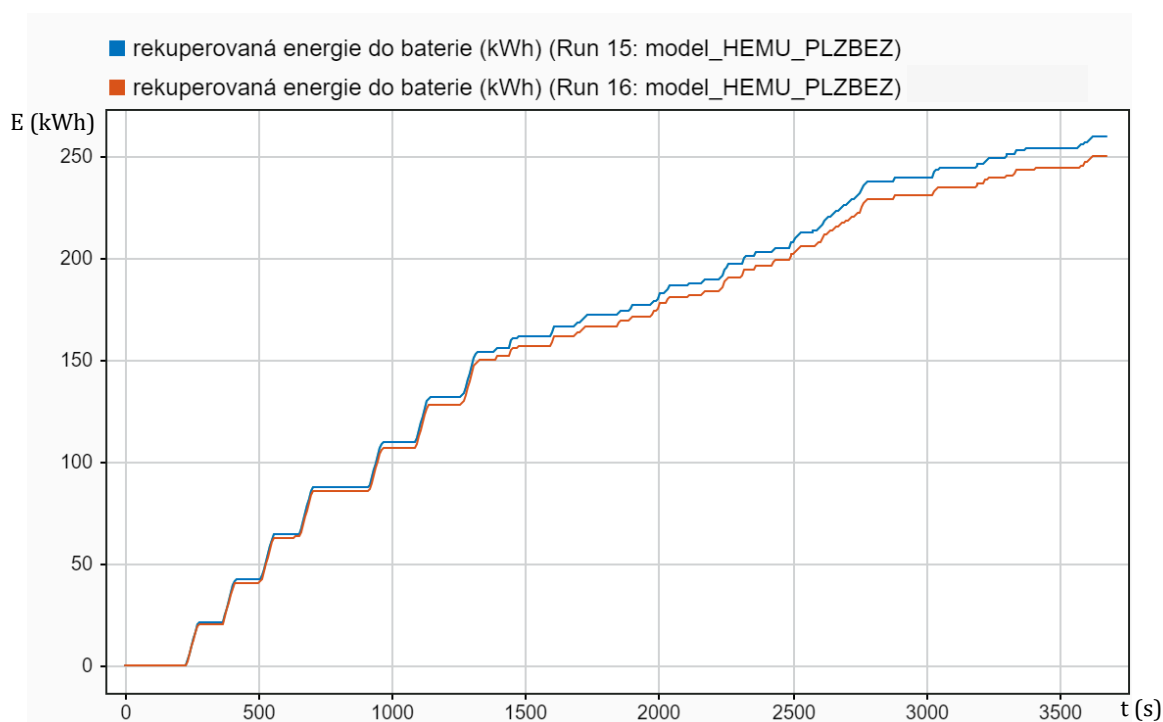
Pro HEMU jednotku se opět využije celá trať z Plzně až do Bezdržic. Výsledky simulací z celé trati Plzeň – Bezdržice a zpět jsou porovnány s BEMU jednotkou. Analogicky jako pro BEMU jednotku pro simulaci zpáteční cesty je uvažováno, že SoC baterie, s jakým vlak přijede, se bude rovnat SoC při odjezdu, tedy, že vlak se v konečné stanici nedobíjí z palivového článku.

### 5.6.2.1 Trať Plzeň – Bezdržice

Jako první budou vyhodnoceny výsledky z trati Plzeň – Bezdržice. Rychlostní profil trati je analogický jako u simulace pro BEMU jednotky. Proto zde není znázorněn. V případě potřeby ho ale lze vyčíst z příložené simulace. Na této trati jsou sledovány průběhy spotřeby a rekuperované energie.

V této simulaci jsou důležité zcela odlišné průběhy nežli v předchozích případech pro jednotky EMU a BEMU. Jelikož vlak není připojen k síti, jako spotřebu je třeba sledovat spotřebovanou energii z palivového článku a po přepočtu i energii odebranou ze sítě pro výrobu tohoto vodíku.

Na obrázku Obr. 5-41 je pro zajímavost vyobrazena celková rekuperovaná energie do baterie vlaku. Ta pomáhá pokrývat potřebu vlaku, a tedy snižovat potřebný výkon z palivového článku. Za celou trať rekuperace pokryje v zimě zhruba 260 kWh. Touto energií se nabíjí trakční baterie, která energii akumuluje, než zase bude potřeba k rozjezdu vlaku.



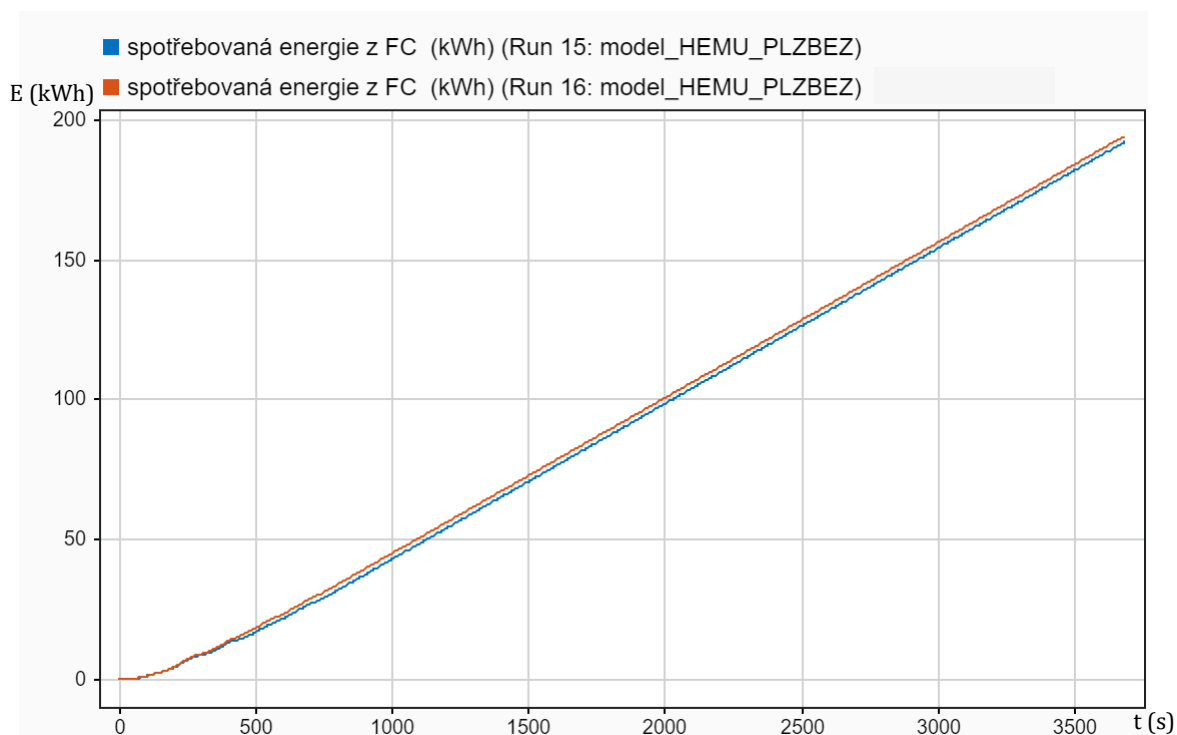
Obr. 5-41 Průběh celkové rekuperované energie do baterie (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – PLZBEZ)



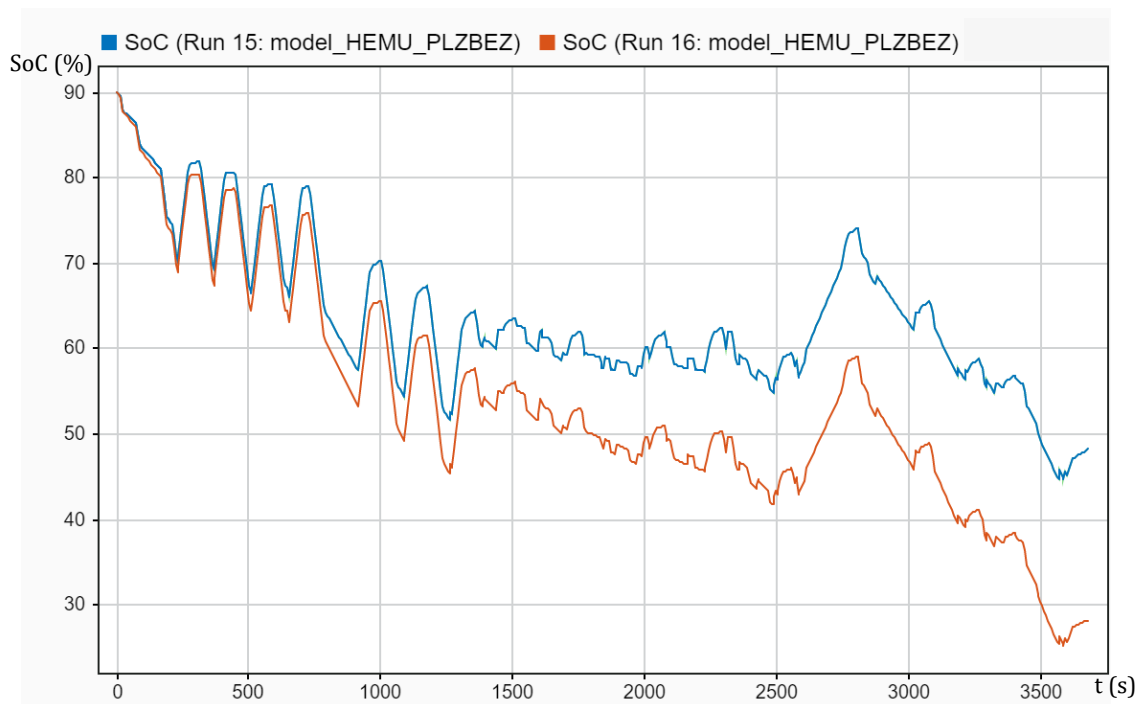
Odlišností od předchozích simulací je ale zbytek průběhů. Zde lze zhodnotit efektivitu napájení z vodíkového článku. Na obrázku Obr. 5-42 je vykreslen průběh spotřeby energie vyrobené právě vodíkovým článkem. Tato energie se podílí na pohonu vlaku a dobíjení baterie. Je dimenzována tak, aby SoC nekleslo na nízké hodnoty blízké 10 % nabití. Celková spotřeba energie z vodíku tedy je 197,3 kWh v zimě a 195,4 kWh v létě.

Pokud je sledována celková spotřeba vlaku, musíme brát v potaz i potřebnou energii pro výrobu a skladování vodíku. Pomocí dat z tabulky (Tabulka 8) tedy jsou hodnoty spotřeby energie z palivového článku přepočítány na spotřebu energie potřebnou k výrobě tohoto vodíku. Výroba vodíku bude v zimě stát 411,5 kWh a v létě 407 kWh. Výsledky jsou velice podobné z důvodu, že většinu času článek dodává 100 % energie a rozdíl se nemůže mezi průběhy zvyšovat. To se podepíše na stavu SoC baterie.

Nakonec z průběhu SoC baterie je vidět, že spotřeba vlaku je pro články na této trati příliš vysoká a články ji nestíhají dobíjet na 90 %. Výkon, ale postačí na bezpečný dojezd do nejvyšší stanice trati – Bezručice. Tam bude v zimě výsledné SoC 28,2 % a v létě 48,2 %.



Obr. 5-42 Průběh celkové spotřebované energie z palivového článku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – PLZBEZ)

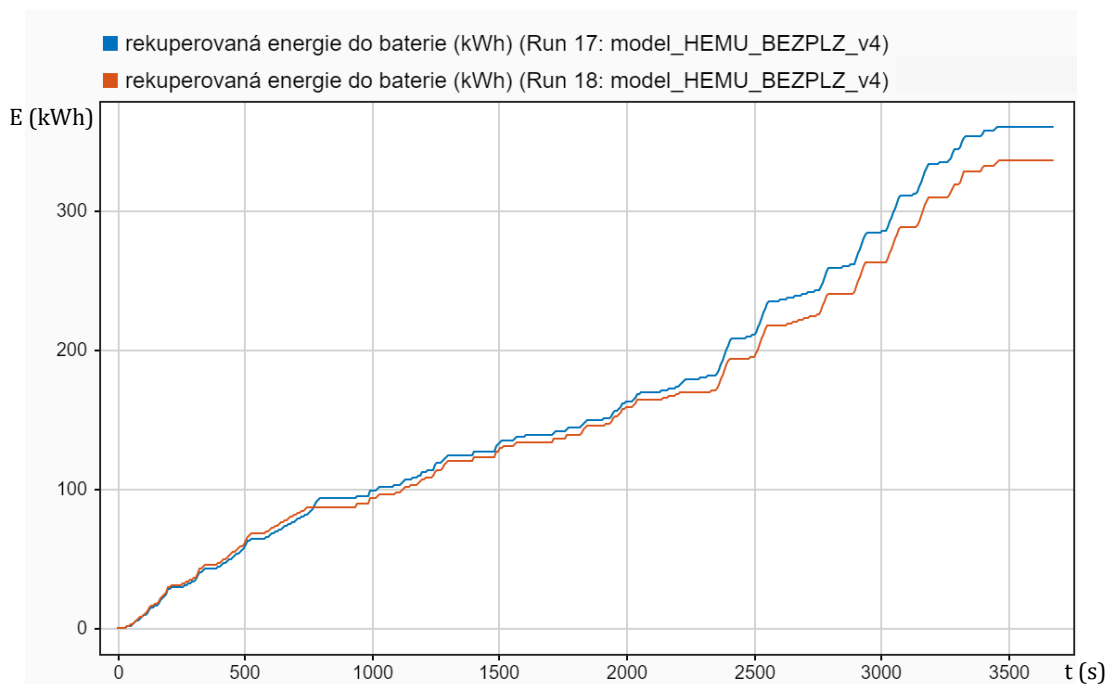


Obr. 5-43 Průběh energie potřebné k výrobě vodíku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – PLZBEZ)

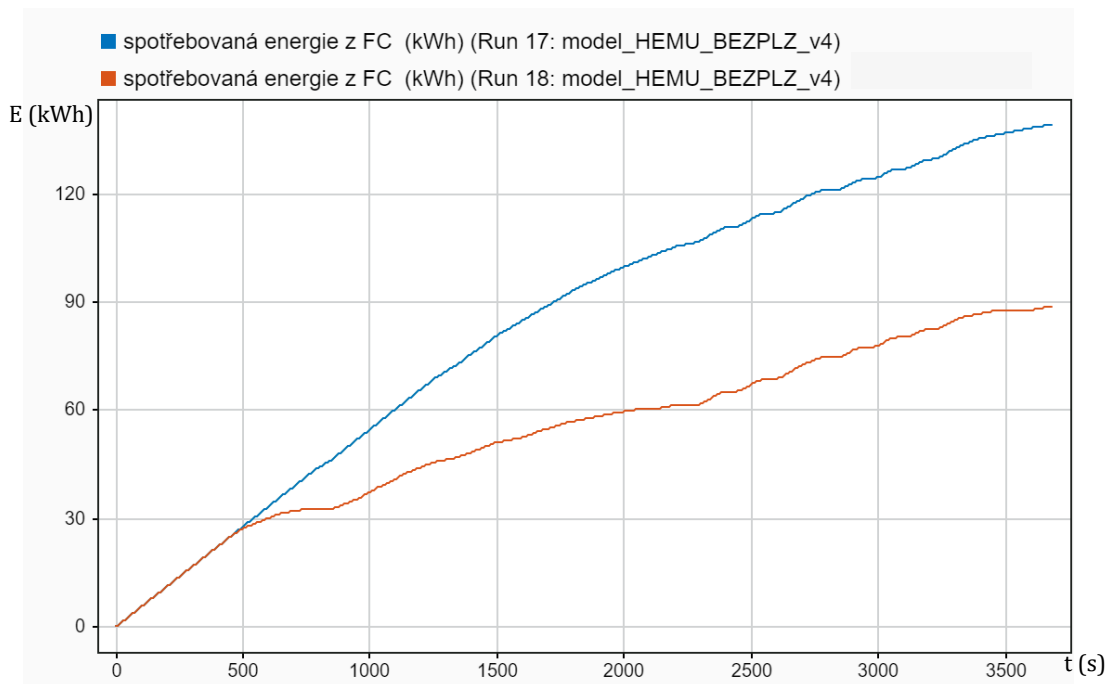
### 5.6.2.2 Trať Bezručice – Plzeň

Jako poslední je provedena simulace pro vodíkovou jednotku zpět z Bezručic do Plzně. Rychlostní profil trati je opět analogický jako pro BEMU jednotku.

Z grafu spotřebované energie lze vyčíst, že rekuperovaná energie má v tomto směru trati výrazně vyšší výslednou hodnotu než po cestě do Bezručic, díky sklonu trati a dá se předpokládat, že vlak zvládne dobít baterii.



Obr. 5-44 Průběh celkové rekuperované energie do baterie (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – BEZPLZ)

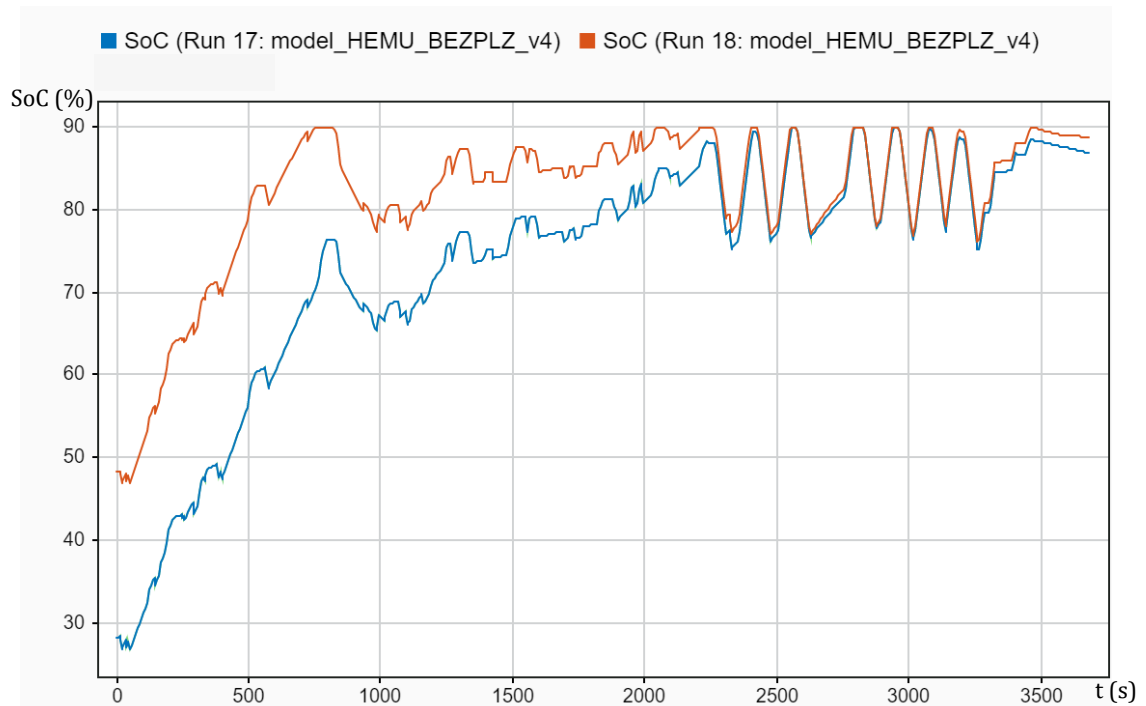


Obr. 5-45 Průběh celkové spotřebované energie z palivového článku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – BEZPLZ)

Opět stěžejní zde jsou průběhy energie spotřebované z vodíku. Aby vlak skončil s baterií nabitou nad 85 %, je spotřeba na celou trasu v zimě 141,2 kWh a v létě 89,5 kWh z vodíku. Lze si povšimnout, že zde jsou rozdíly mezi zimou a létem téměř dvojnásobné. Na výrobu vodíku je v zimě potřeba 295,7 kWh a v létě 188,5 kWh.

Na posledním průběhu je vyobrazeno, jak v průběhu cesty kolísá nabití baterie. To se nakonec v zimě ustálí na 85,5 % a v létě 88,8 % SoC.

Další důležité průběhy jsou v příloze C.8



Obr. 5-46 Průběh energie potřebné k výrobě vodíku (zima – modrá x léto – červená) (HEMU – BEZPLZ)

### 5.6.3 Vyhodnocení průběhů HEMU

Vodíkové jednotky jsou porovnávány na celé délce trati Plzeň – Bezručice – Plzeň s bateriovými jednotkami. Vstupním předpokladem u obou vlaků je, že vyjíždí s plně nabitou baterií z Plzně do Bezručic a zároveň se s plně nabitou baterií vrací zpět.

V tabulce (Tabulka 9) jsou vypsány důležité hodnoty z jízdy vlaku, které slouží k porovnání s jednotkou BEMU. Pro zajímavost je zde uvedena v kg spotřeba vodíku. Zásadní ale je samozřejmě hodnota, kterou je potřeba ze sítě odebrat, aby se toto množství vodíku vyrobilo. Ta je vypočítána pomocí hodnot z tabulky (Tabulka 8). Jelikož vlak do Plzně nedorazí s 90 % baterie, je přičtena manuálně hodnota energie, která je potřeba pro dobíjení baterie na výchozí hodnotu.

Díky tomuto je získána potřebná energie pro dojezd vlaku z Plzně do Bezručic a zpět. Právě z této hodnoty je poté vypočítána průměrná spotřeba na km jízdy.

	Zima		léto	
	PLZ – BEZ	BEZ – PLZ	PLZ – BEZ	BEZ – PLZ
Spotřeba vodíku	8,23 kg	5,92 kg	8,15 kg	3,77 kg
Potřebná energie na výrobu vodíku	411,5 kWh	295,7 kWh	407 kWh	188,5 kWh
Průměrná spotřeba	8,76 kWh/km	6,29 kWh/km	8,66 kWh/km	4,01 kWh/km
Celková spotřeba	720,2 kWh		596 kWh	
Průměrná spotřeba PLZ–BEZ–PLZ	7,66 kWh/km		6,34 kWh/km	

Tabulka 9 – Výsledné hodnoty spotřebované energie HEMU jednotek

V tabulce (Tabulka 10) jsou vypsány průběhy stavů nabití baterie v průběhu jízdy. Z těchto průběhů je vidět, že ve směru do kopce palivový článek nestíhá dobíjet baterii, protože odběr výkonu je moc vysoký. Do stanice ale bezpečně s rezervou dojede a na cestě zpět se dobije téměř na původních 90 %.

SoC	Zima	Léto
Plzeň	90 %	90 %
Bezručice	28,2 %	48,2 %
Plzeň	86,9 %	88,8 %

Tabulka 10 – Stavby nabití baterie na průběhu trati HEMU

## KAPITOLA 6: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ PRO JEDNOTLIVÉ TYPY NAPÁJENÍ

V této kapitole jsou vyhodnoceny výsledky simulací a je zde porovnávána vhodnost jednotlivých typů vlaků pro trať Plzeň – Pňovany – Bezručice.

### 6.1 Porovnání EMU a BEMU jednotky

Nejprve byla simulována část trati z Plzně do Pňovan a zpět. Zde je porovnávána spotřeba EMU a BEMU jednotky. V tabulce (Tabulka 11) jsou vypsané nejdůležitější výsledné hodnoty obou simulací. Podle očekávání se zde nejvíce vyplatí jednotka napájená čistě z troleje. Rozdíl tvoří hmotnost vlaku. Ta sice pomáhá při rekuperaci, jelikož vlak pohání vyšší setrvačností dopředu, ale při rozjezdu je také potřebná energie samozřejmě vyšší. BEMU vlak s 10 t navíc to na celé trati stojí i v létě i v zimě zhruba 7 kWh. Proto jsou výsledné průměrné spotřeby o několik desítek Wh vyšší než v případě EMU jednotky.

Na čistě elektrizované vlaky nedává smysl používat bateriové jednotky, pokud jsou k dispozici jednotky EMU.

	PLZ – PŇO – PLZ (EMU)		PLZ – PŇO – PLZ (BEMU)	
	zima	léto	zima	léto
Spotřebovaná energie ze sítě	483 kWh	462,5 kWh	491,5 kWh	472,5 kWh
Rekuperovaná energie do sítě	308 kWh	319,5 kWh	315 kWh	326,5 kWh
Spotřebovaná – rekuperovaná energie	175 kWh	143 kWh	176,5 kWh	146 kWh
Průměrná spotřeba	3,8 kWh/km	3,11 kWh/km	3,84 kWh/km	3,17 kWh/km

Tabulka 11 – Porovnání výsledků EMU a BEMU jednotek na trati Plzeň – Pňovany

### 6.2 Porovnání BEMU a HEMU jednotky

Na celé délce trati Plzeň – Bezručice – Plzeň již lze porovnat pouze jednotky BEMU a HEMU. I když bylo očekáváno, že vodíkové jednotky budou méně výhodné, výsledky ukazují že jejich spotřeba je více než 2x vyšší než u bateriových. To je z důvodu velmi nízké účinnosti výroby vodíku a jeho zpětné přeměny na elektrickou energii. Na kilometr potom spotřeba dosahuje v zimních měsících až 7,66 kWh/km. Vodíkový vlak také nemá možnost rekuperovat do sítě, tím se spotřeba také zvýší.

	PLZ – BEZ – PLZ (BEMU)		PLZ – BEZ – PLZ (HEMU)	
	zima	léto	zima	léto
Spotřebovaná energie ze sítě	610 kWh	556,5 kWh	720,2 kWh	596 kWh
Rekuperovaná energie do sítě	254,5 kWh	286 kWh	-	-
Spotřebovaná – rekuperovaná energie	355,5 kWh	270 kWh	720,2 kWh	596 kWh
Průměrná spotřeba	3,78 kWh/km	2,87 kWh/km	7,66 kWh/km	6,34 kWh/km

Tabulka 12 – Porovnání výsledků BEMU a HEMU jednotek na trati Plzeň – Bezručice

---

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout trakční koncepce pro řešení elektrických motorových jednotek s alternativním napájením, a poté je porovnat pomocí simulace a ověřit funkčnost těchto modelů na konkrétním příkladu tratě. Pro tuto práci je tedy použita jednotka napájená čistě z trakční sítě (EMU), jednotka napájená jak ze sítě, tak z baterie (BEMU) a jednotka napájená z vodíkového článku (HEMU).

Nejprve byla navržena trakční koncepce pro jednotlivé druhy napájení. Ty lze nalézt v kapitole (Kapitola 4:), kde jsou tyto silové obvody vyobrazeny a porovnány jejich rozdíly. Z těchto konceptů lze vyvodit závěr, že koncept EMU je nejjednodušší z hlediska skladby komponentů. Předpokladem pro simulace tedy bylo, že vlak EMU by měl být pro trasu s trakčním vedením nejefektivnější řešení. Jako trasa pro simulaci byla zvolena trať Plzeň – Bezručovice, kde je kombinace pokrytí trati trakční sítí a část trati bez ní. Zde lze tedy porovnat všechny vlastnosti vlakových jednotek.

Tuto hypotézu je možno ověřit po vytvoření modelů všech typů vlaků v programu SIMULINK. Každý typ vlaku má svojí simulaci a každá tato simulace má dva směry (např. Plzeň-Bezručovice a Bezručovice-Plzeň). Na elektrifikované části trati jsou porovnány vlaky EMU a BEMU. Z výsledků simulace byl potvrzen původní předpoklad. Vlak EMU, i když jen o pár kWh, má nejnižší spotřebu na trati Plzeň – Pňovany a zpět. Závěrem je, že tento vlak je pro trasy pokryté napájením z trakční sítě nejvhodnější.

Na celé délce trati i s částí bez elektrifikace bylo možné porovnat jednotku BEMU a HEMU. Bylo očekáváno, že vlak napájený z vodíku bude mít vyšší celkovou spotřebu ze sítě než vlak bateriový. Jeho spotřeba je na této trati ale více než dvakrát vyšší. To je z důvodu neefektivní přeměny elektrické energie na vodík a zpět. Dokud tento proces nebude účinnější, nevyplatí se z energetického hlediska tyto typy vlaku provozovat. V blízké budoucnosti by se měly pro tyto tratě využívat jednotky napájené z baterií, které nabízejí řešení pro nahrazení diesellových vlaků pro krátké tratě mimo elektrifikovanou železnici. Pro tratě delší je jediná možnost z alternativních typů napájení pořád pouze neefektivní vlak s vodíkovým palivovým článkem.

V budoucnosti s rychlým vývojem nových technologií se mohou tyto závěry změnit.

## LITERATURA

- [1] STEIMEL, Andreas. *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply*. Oldenbourg Industrieverlag München, 2008. ISBN 978-3-8356-3132-8.
- [2] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce. 1, Přehled problematiky*. 2. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2009, 2008. ISBN 978-80-7043-769-8.
- [3] *A Refined Model for Carbon Footprint Estimation in Electric Railway Transport*. Online. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/373877855\\_A\\_Refined\\_Model\\_for\\_Carbon\\_Footprint\\_Estimation\\_in\\_Electric\\_Railway\\_Transport](https://www.researchgate.net/publication/373877855_A_Refined_Model_for_Carbon_Footprint_Estimation_in_Electric_Railway_Transport). [cit. 2024-05-13].
- [4] *Regionální vlaky s komfortem expresů budou jezdit i v Karlovarském kraji*. Online. Dostupné z: <https://vary.rozhlas.cz/regionalni-vlakly-s-komfortem-expresu-budou-jezdit-i-v-karlovarskem-kraji-7805211>. [cit. 2024-05-13].
- [5] *RYCHLOVLAKEM Z PRAHY DO BRNA LEVNĚ*. Online. Dostupné z: <https://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/rychlovlakem-z-prahy-do-brna-levne/>. [cit. 2024-05-13].
- [6] *Elektrické jednotky 471 v roce 2010*. Online. Dostupné z: <https://spz.logout.cz/novinky/novinky.php?poradi=1263>. [cit. 2024-05-13].
- [7] *Adhesion*. Online. Dostupné z: [https://indianrailways.gov.in/railwayboard/uploads/directorate/eff\\_res/camtech/Electrical\\_Engineering/YearWise/STC-TRS-Conv-03-Supplement-mech.pdf](https://indianrailways.gov.in/railwayboard/uploads/directorate/eff_res/camtech/Electrical_Engineering/YearWise/STC-TRS-Conv-03-Supplement-mech.pdf). [cit. 2024-05-13].
- [8] *Regenerative braking in 50 Hz, 25 kV systems*. Online. Dostupné z: [https://www.railway-energy.org/static/Regenerative\\_braking\\_in\\_50\\_Hz\\_25\\_kV\\_systems\\_104.php](https://www.railway-energy.org/static/Regenerative_braking_in_50_Hz_25_kV_systems_104.php). [cit. 2024-05-13].
- [9] *Siemens Mobility dodá 28 jednotek Mireo pro Bádensko-Württembersko*. Online. Dostupné z: <https://www.siemenspress.cz/siemens-mobility-doda-28-jednotek-mireo-pro-badensko-wuerttembersko/>. [cit. 2024-05-13].
- [10] *Pantograf*. Online. Dostupné z: <https://www.atlaslokomotiv.net/konstrukce/polopantograf.jpg>. [cit. 2024-05-13].
- [11] *Měřicí transformátor napětí*. Online. Dostupné z: <https://www.kpbindra.cz/transformatory-napeti-vnitri-provedeni/pristrojovy-transformator-napeti-podperny-vtd-25-01/>. [cit. 2024-05-13].
- [12] *Proudový transformátor*. Online. Dostupné z: <https://www.elproz.cz/merici-transformatory-rady-45-21/45-21-200a/>. [cit. 2024-05-13].
- [13] *AC Vacuum Circuit-Breaker type BVAC*. Online. Dostupné z: [https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2021/10/SG310272BEN\\_A02\\_Brochure\\_Circuit-breaker-AC\\_BVAC\\_01.06-4.pdf](https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2021/10/SG310272BEN_A02_Brochure_Circuit-breaker-AC_BVAC_01.06-4.pdf). [cit. 2024-05-22].
- [14] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce IV*. 2. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita, 2007. ISBN 978-80-7043-586-1.
- [15] *Tractronic*. Online. Dostupné z: [https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/ad1eb424-f4f5-4f37-80be-b05700c109dc/Tractronic-Updated-20220613-pdf\\_Original\\_file.pdf](https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/ad1eb424-f4f5-4f37-80be-b05700c109dc/Tractronic-Updated-20220613-pdf_Original_file.pdf). [cit. 2024-05-13].
- [16] *Selected conducted electromagnetic interference issues in distributed power systems*. Online. 2009. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228671066\\_Selected\\_conducted\\_electromagnetic\\_interference\\_issues\\_in\\_distributed\\_power\\_systems/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/228671066_Selected_conducted_electromagnetic_interference_issues_in_distributed_power_systems/figures?lo=1). [cit. 2024-05-21].
- [17] PREMIUM POWER SUPPLIES. *High-Power Solutions Especially Designed for Railway Technology by Premium PSU*. Online. Dostupné z: <https://railway-news.com/come-and-meet-premium-psu-at-innotrans-2022/>. [cit. 2024-05-13].
- [18] MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. *Traction system's roof-mounted converter and inverter with natural air-cooling system*. Online. Dostupné z: <https://www.mitsubishielectric.com/news/2022/0208.html>. [cit. 2024-05-13].
- [19] NOVÁK, Pavel. *Přehled elektrické trakce, přednáška na FEL ČVUT*. Pdf. [cit. 2024-05-13].
- [20] SIEMENS MOBILITY. *MoComp Traction Motors*. Online. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock-components/traction-motors.html>. [cit. 2024-05-13].
- [21] KOLÁŘ, Josef. MODERN VEHICLES FOR REGIONAL RAILWAYS. Online. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2023, s. 10. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/113052/656eeeb6e6e24.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [cit. 2024-05-13].
- [22] *Feasibility study to examine Taxirail introduction*. Online. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/passenger/main-line/feasibility-study-to-examine-taxirail-introduction/>. [cit. 2024-05-13].

- 
- [23] SIEMENS MOBILITY. *Totally fit for the future – Mireo Plus B*. Online. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/company/stories/totally-fit-for-the-future-mireo-plus-b.html>. [cit. 2024-05-13].
- [24] *Will battery or hydrogen trains be the future? The vision of Siemens Mobility*. Online. Dostupné z: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2023/05/04/will-battery-or-hydrogen-trains-be-the-future-the-vision-of-siemens-mobility/>. [cit. 2024-05-13].
- [25] SIEMENS MOBILITY. *Mireo Plus H – The next generation of hydrogen trains*. Online. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-h.html>. [cit. 2024-05-13].
- [26] SŽDC. *Označení tratí podle tabulek traťových poměrů*. Online. Dostupné z: <https://www.iwan.eu07.pl/jw/2020/data/mapy/TTP.pdf>. [cit. 2024-05-13].
- [27] ŽP. *Popis trati 178 (Praha - ) Plzeň – Cheb - Česká republika*. Online. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/trate/ceska-republika/trat-178?lang=cs>. [cit. 2024-05-13].
- [28] ABB. *ABB breakthrough transformer for trains improves efficiency and safety significantly*. Online. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/7269/abb-breakthrough-transformer-for-trains-improves-efficiency-and-safety-significantly>. [cit. 2024-05-13].
- [29] *Co spotřebuje vagón?* Online. Dostupné z: <https://www.vagony.cz/vagony/energie.html>. [cit. 2024-05-13].
- [30] CC BY 4.0. *The OCV-SOC characteristic of the LTO-based battery measured at  $T = 25 \cdot C$* . Online. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/324117029\\_Influence\\_of\\_Battery\\_Parametric\\_Uncertainties\\_on\\_the\\_State-of-Charge\\_Estimation\\_of\\_Lithium\\_Titanate\\_Oxide-Based\\_Batteries/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/324117029_Influence_of_Battery_Parametric_Uncertainties_on_the_State-of-Charge_Estimation_of_Lithium_Titanate_Oxide-Based_Batteries/figures?lo=1). [cit. 2024-05-13].
- [31] *Some rules of thumb of the hydrogen economy*. Online. Dostupné z: <https://www.carboncommentary.com/blog/2021/6/11/some-rules-of-thumb-of-the-hydrogen-economy>. [cit. 2024-05-13].
- [32] *Vodík: Nejlehčí prvek je největší výzva*. Online. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vodik/vodik-nejlehci-prvek-nejvetsi-vyzva>. [cit. 2024-05-13].
- [33] FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE. Online. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/fuel-cells-fact-sheet>. [cit. 2024-05-13].



## PŘÍLOHA A: PŘÍKLAD SEZNAMU SYMBOLŮ A ZKRATEK

### A.1 Seznam symbolů

$F_t$ (N)	tažná síla
$m$ (kg)	hmotnost
$a$ ( $ms^{-2}$ )	zrychlení
$p_0$ (–)	měrný jízdní odpor
$g$ ( $ms^{-2}$ )	tíhové zrychlení
$a$ (–)	koeficient suchého tření
$b$ (–)	koeficient kapalinového tření
$c$ (–)	koeficient aerodynamického odporu
$\alpha$ (–)	sklon trati
$s$ (‰)	gradient trati
$p_r$ (–)	měrný odpor oblouku
$p_{acc}$ (–)	měrný odpor zrychlením
$\xi$ (–)	tolerance pro rotační hmotu
$\mu$ (–)	koeficient adheze
$N$ (N)	tíha na nápravu
$v$ (km/h)	rychlost
$U_a$ (V)	napětí na sekundáru
$X_a$ ( $\Omega$ )	rozptylová reaktance transformátoru
$I_a$ (A)	proud na sekundáru
$U_v$ (V)	napětí na vstupu do usměrňovače
$C$ (mF)	kapacita
$I_d$ (A)	proud meziobvodu
$g_1$ (–)	koeficient „otevření“ měniče
$\sin\varepsilon$ (–)	fázový posun
$M$ (Nm)	moment
$E$ (kWh)	energie

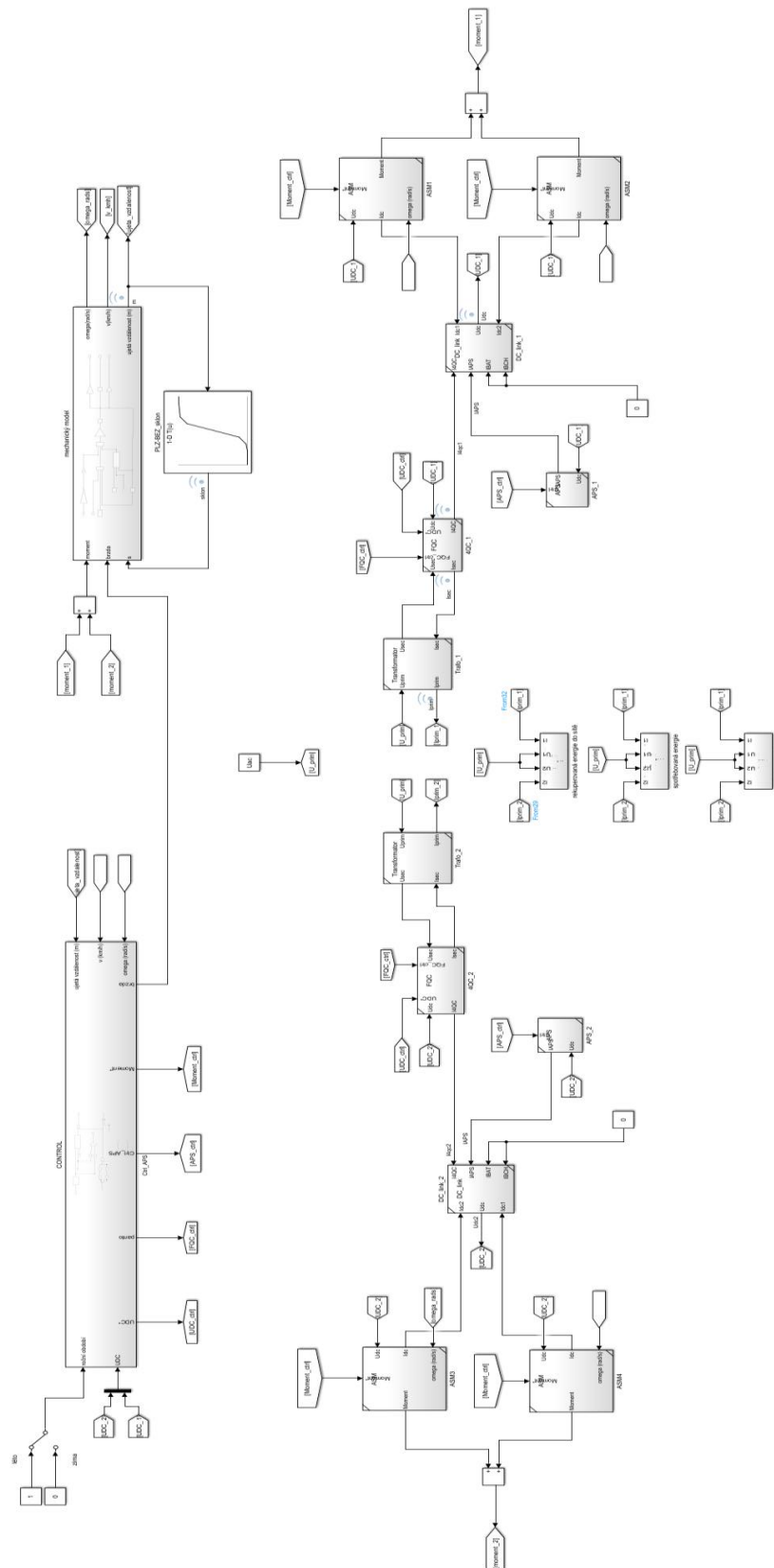
### A.2 Seznam zkratk

DC	stejnoseměrný proud (direct current)
AC	střídavý proud (alternating current)
MHD	městská hromadná doprava
APS	pomocné systémy vlaku (Auxilliary power systems)
MTN	měřicí transformátor napětí
4QC	čtyřkvadrantový měnič (Fourquadrant converter)
PWM	pulsně šířková modulace (Pulse-width modulation)
DC/DC	stejnoseměrný měnič
SiC	Silicon Carbide
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
DTC	přímé řízení momentu (Direct traction control)
FOC	vektorové řízení (field oriented control)
ASM	asynchronní motor
EMU	elektrická vlaková jednotka (Electric multiple unit)
BEMU	bateriová vlaková jednotka (Battery-electric multiple unit)
HEMU	vodíková vlaková jednotka (Hydrogen-electric multiple unit)
BCH	měnič pro brzdění (brake chopper)

SOC	stav nabití baterie (State of Charge)
FC	palivový článek (Fuel cell)

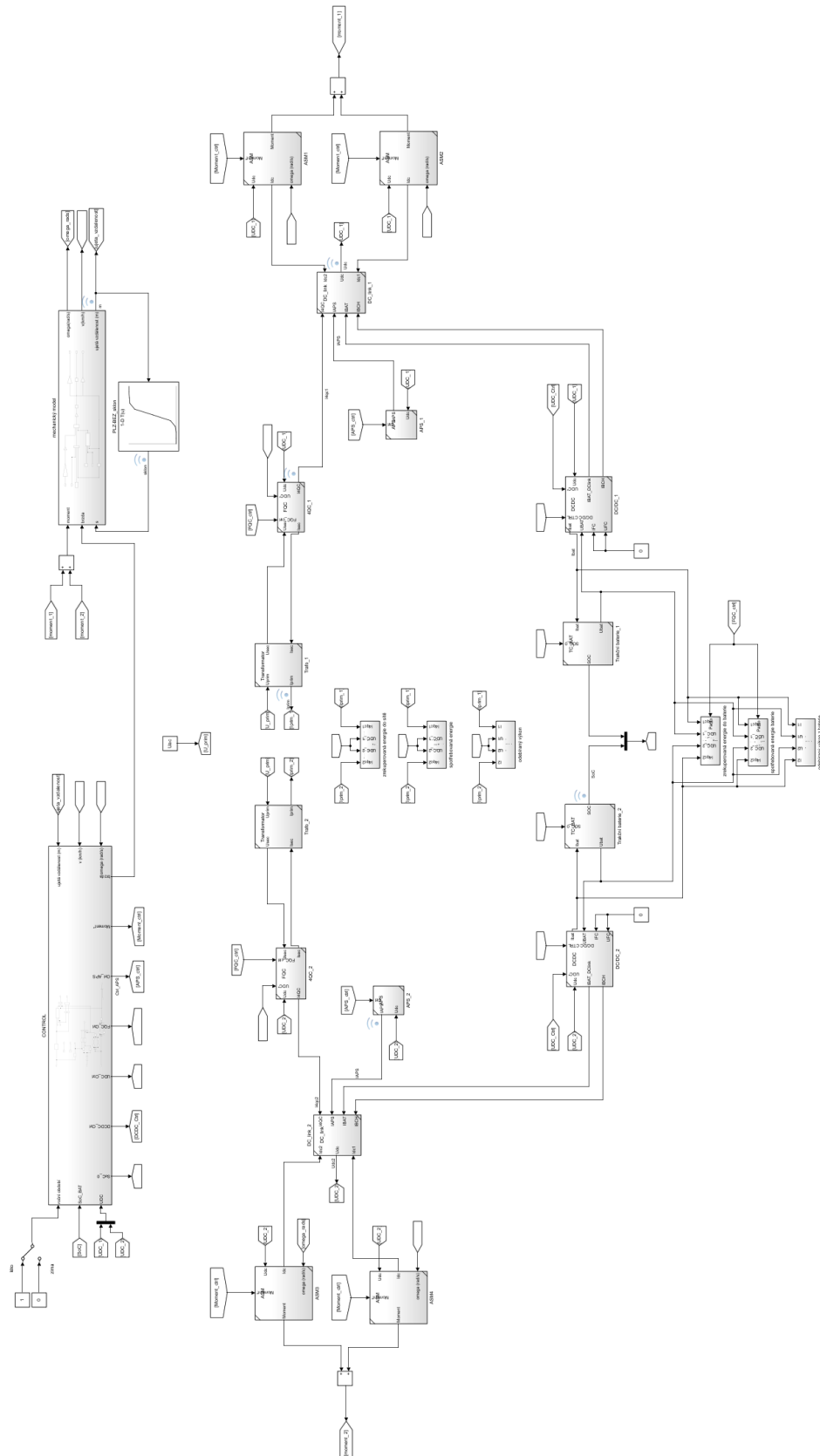
# PŘÍLOHA B: MODELY V SIMULINKU

## B.3 EMU



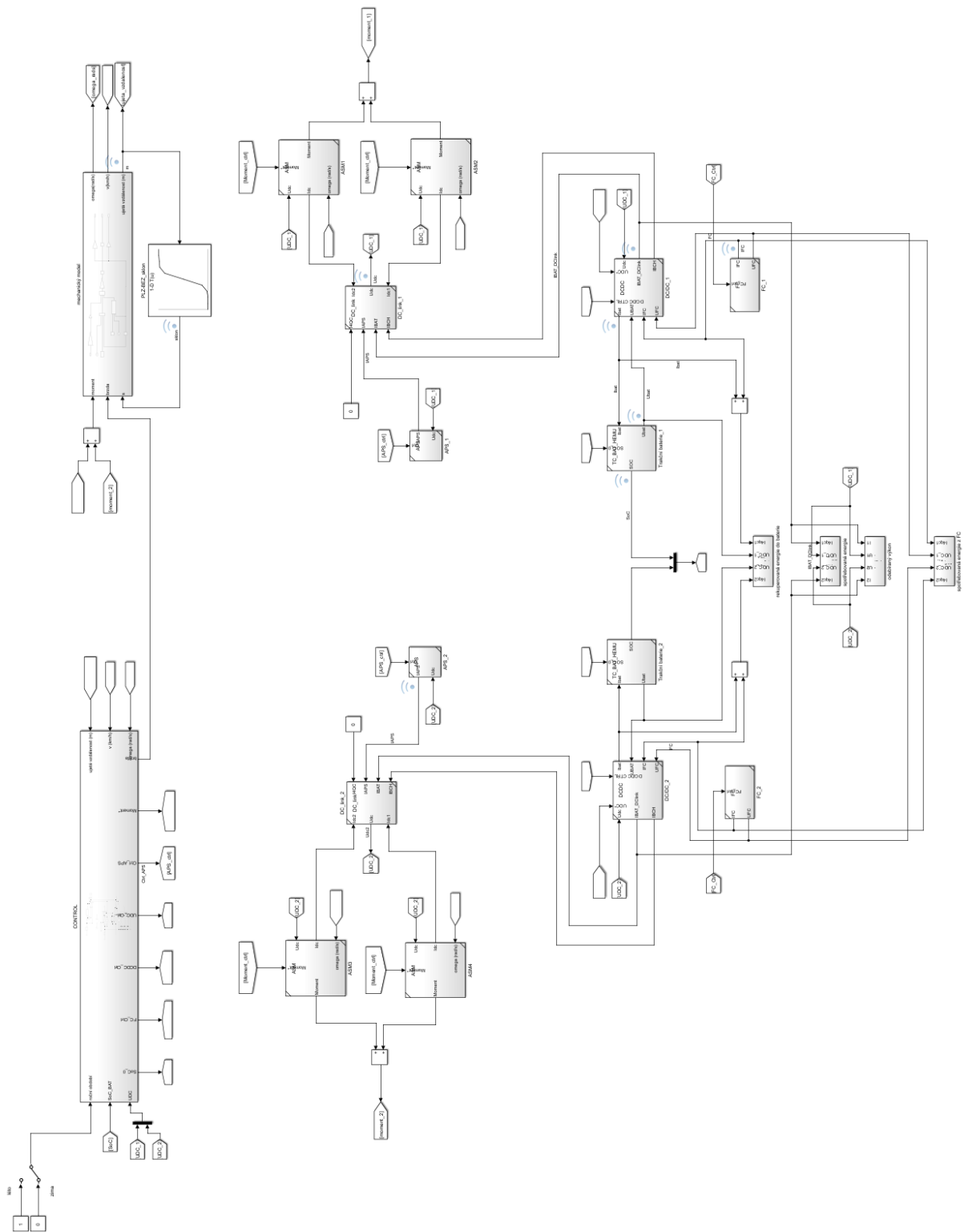
Obr. B-1 Celkový model EMU v SIMULINKu

**B.4 BEMU**



Obr. B-2 Celkový model BEMU v SIMULINKu

## B.5 HEMU

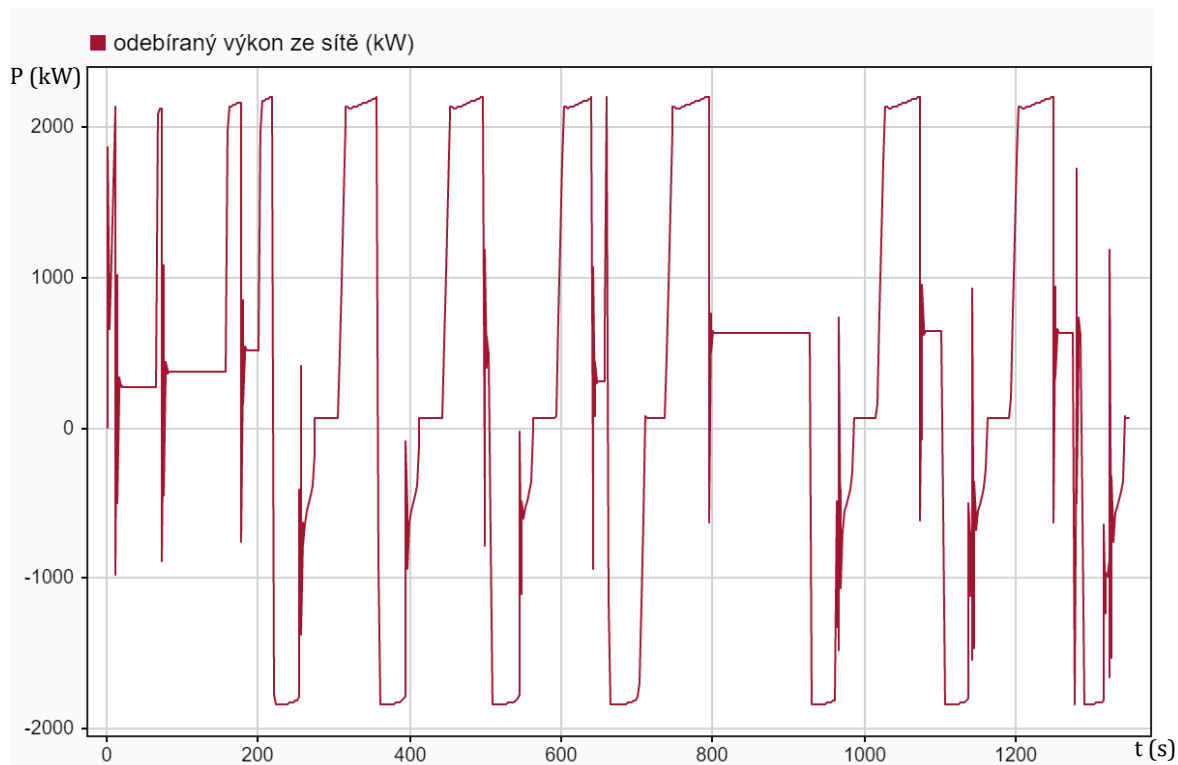


Obr. B-3 Celkový model HEMU v SIMULINKu

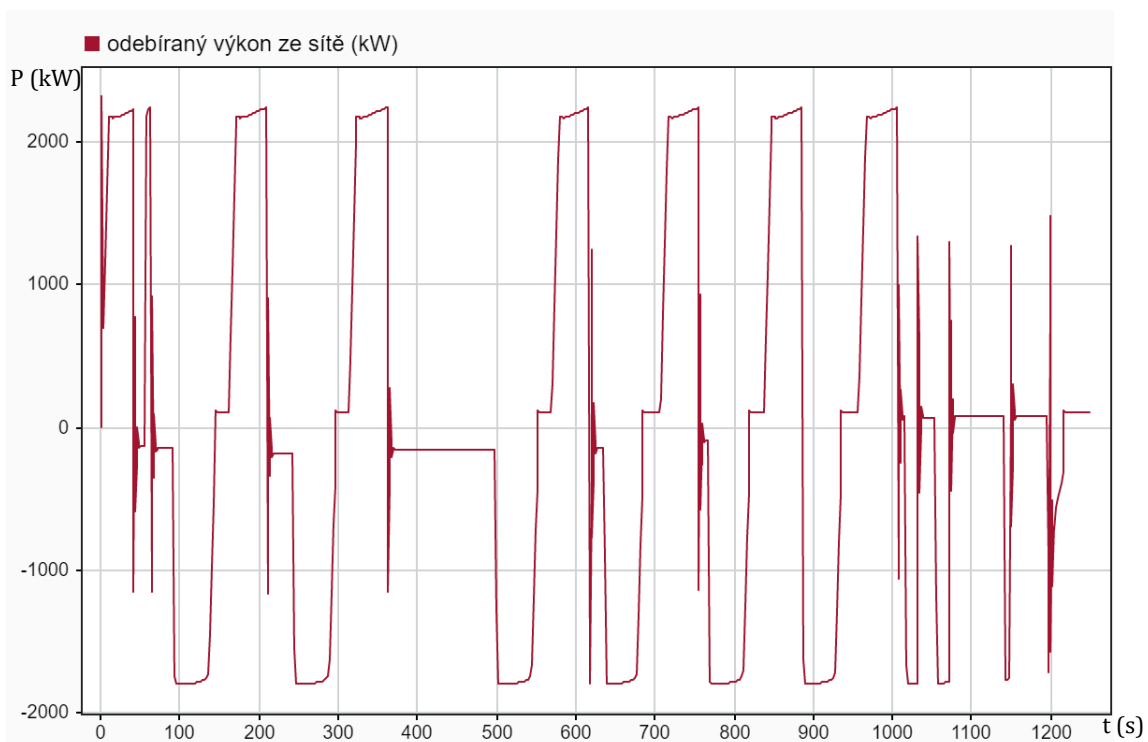
## PŘÍLOHA C: PRŮBĚHY VELIČIN

Zde jsou vyobrazeny další podstatné průběhy pro jednotlivé alternativy vlakových jednotek. Všechny jsou vyobrazeny v letních měsících. Zimní se budou lišit pouze o konstantní hodnotu, již je vlastní spotřeba (o 40 kW vyšší).

### C.6 EMU

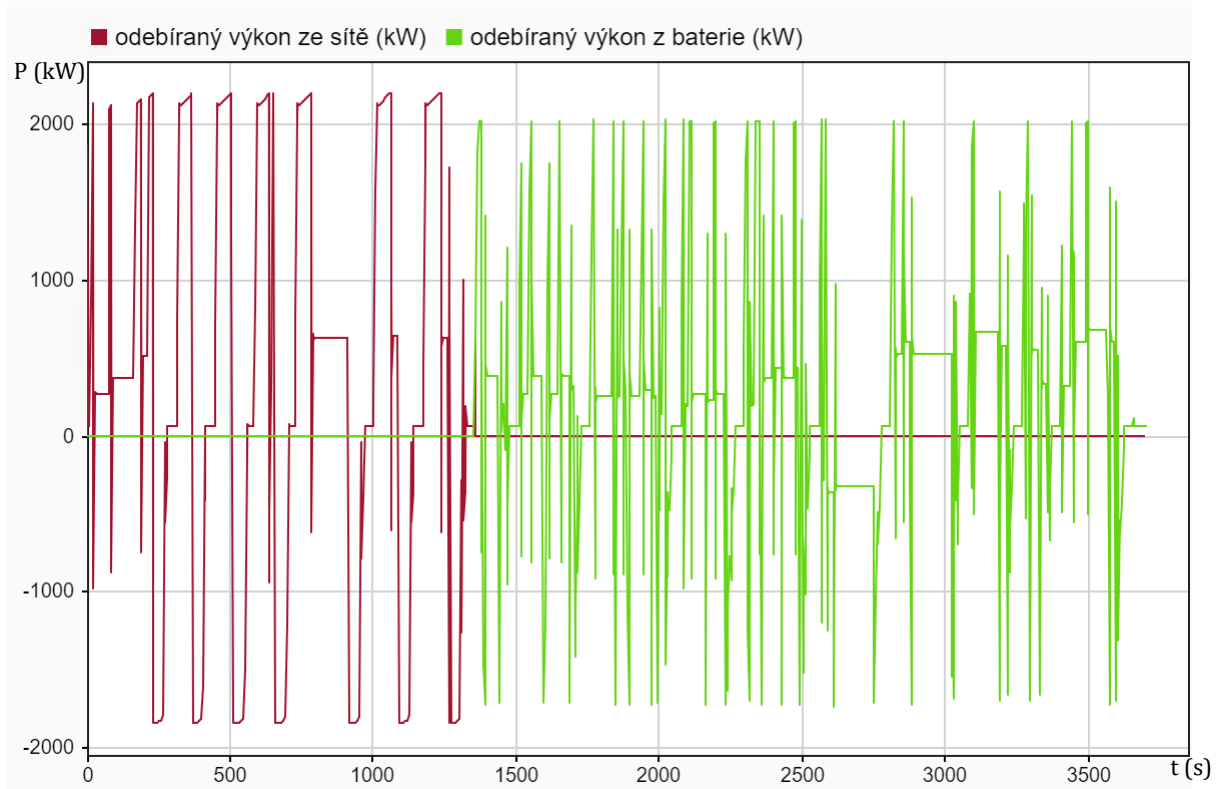


Obr. C-1 Průběh odebíraného výkonu ze sítě EMU (PLZ-PŇO, léto)

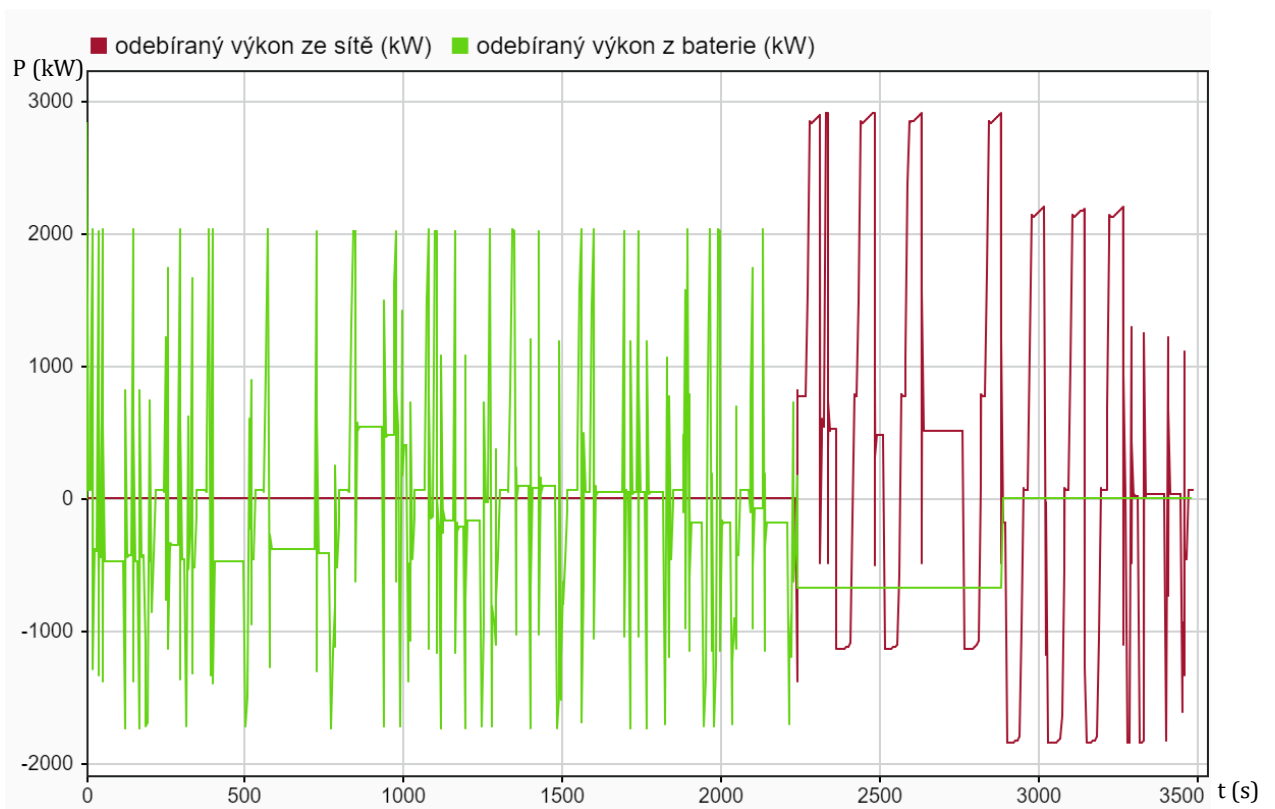


Obr. C-2 Průběh odebíraného výkonu ze sítě EMU (PŇO-PLZ, léto)

## C.7 BEMU

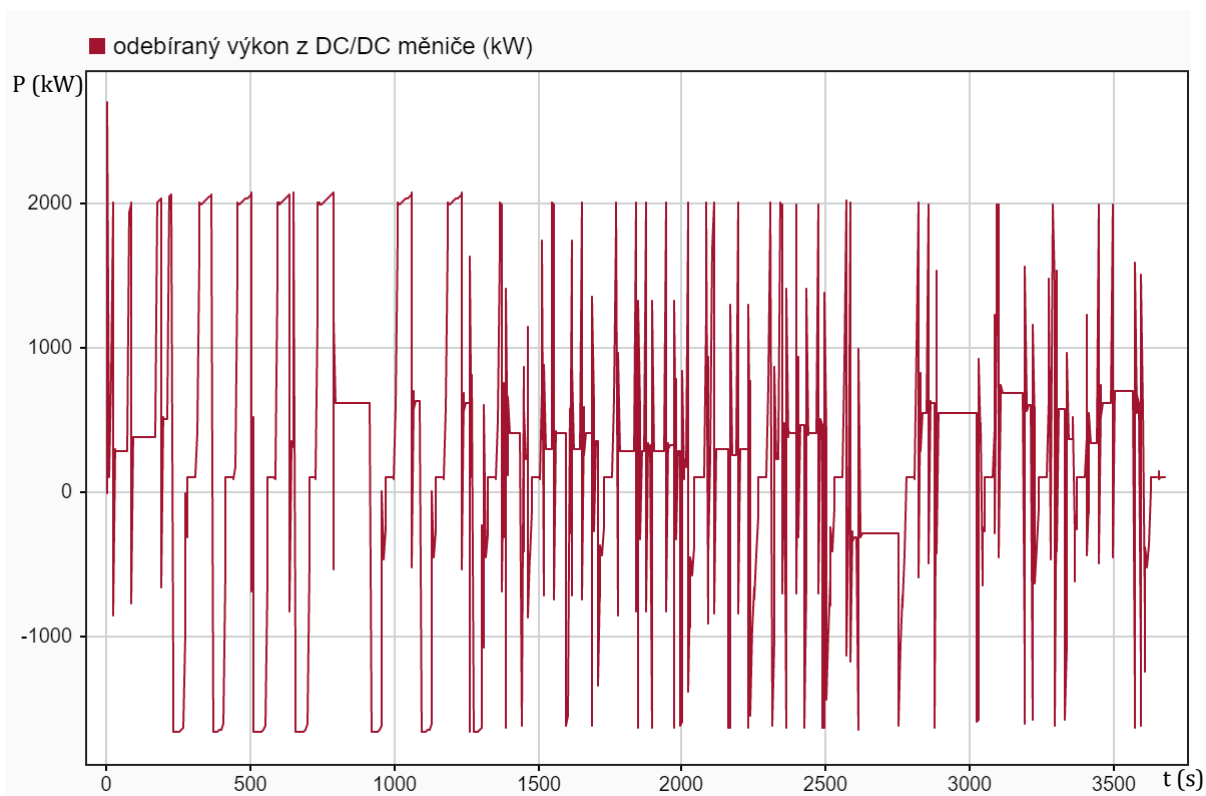


Obr. C-3 Průběh odebraného výkonu ze sítě a z baterie BEMU (PLZ-BEZ, léto)

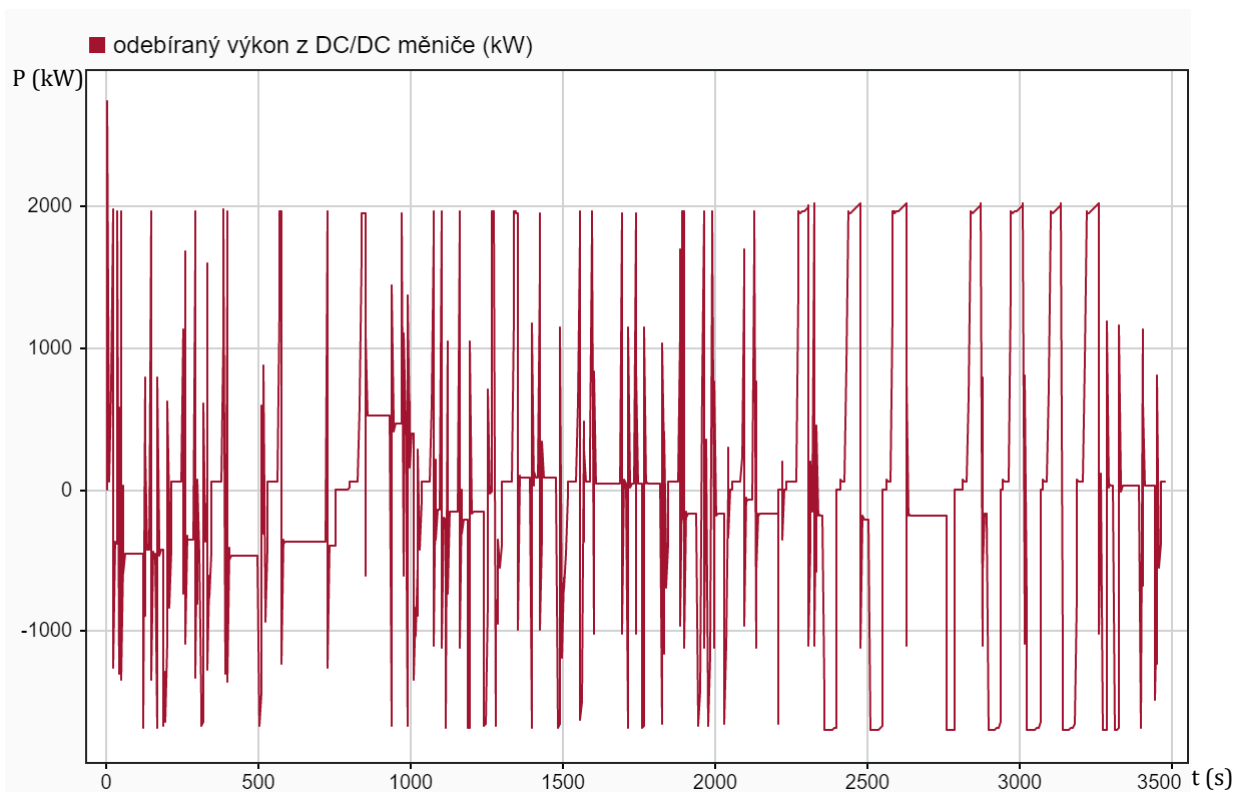


Obr. C-4 Průběh odebraného výkonu ze sítě a z baterie BEMU (BEZ-PLZ, léto)

## C.8 HEMU



Obr. C-5 Průběh odebíraného výkonu z DC/DC měniče do meziobvodu HEMU (PLZ-BEZ, léto)



Obr. C-6 Průběh odebíraného výkonu z DC/DC měniče do meziobvodu HEMU (BEZ-PLZ, léto)