



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ELEKTRICKÉ MODELÝ REKUPERAČNÍCH ZÁTĚŽÍ PRO NAPAJEČ STŘÍDAVÉHO TRAKČNÍHO VEDENÍ 25 KV, 50 HZ

ELECTRICAL MODELS OF RECUPERATIVE LOADS FOR ELECTRICAL RAILWAY TRACTION SYSTEM
FEEDER 25 KV, 50 HZ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Bureš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Klusáček

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jan Bureš

ID: 220755

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické modely rekuperačních zátěží pro napaječ střídavého trakčního vedení 25 kV, 50 Hz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Výběr relevantních ukazatelů charakteru odběru kolejových vozidel s ohledem na vybavení střídavých trakčních soustav
2. Kategorizace kolejových vozidel provozovaných na železničních tratích v České Republice, blokové zapojení elektrické výzbroje, limitní parametry
3. Sestavení modelů kategorií vozidel v programu PSCAD, simulace jejich provozu
4. Vyhodnocení výsledků simulace v kontextu ukazatelů kvality odběru vozidel

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jan Klusáček

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá modelováním trakčních vozidel z hlediska kvality odběru a odběru výkonu provozovaných v České republice (ČR) na elektrické trakční soustavě 25 kV/50 Hz. S ohledem na historický vývoj hnacích vozidel je provedena kategorizace lokomotiv provozovaných na území ČR podle jejich elektrické výzbroje a typické kvality odběru. Modely jednotlivých kategorií jsou vytvořené v simulačním softwaru PSCAD. V rámci bakalářské práce je dále navržen systém ovládání a výkonové parametrizace modelů na základě vnějšího popisu, tj. parametrů lokomotiv, profilu tratě a žádané dynamiky jízdy. Navržené modely jsou tak vhodné pro simulaci profilu toku energie v trakční soustavě jako celku.

Klíčová slova

Konverze napájecího systému, elektrická trakční soustava, kvalita odběru, lokomotiva, pohybová rovnice, PSCAD.

Abstract

The thesis deals with the modeling of drive vehicles from the point of power consumption and its quality that are being run in the Czech republic on the 25 kV/50 Hz current system. The locomotives being run on Czech territory are categorized according to their electric equipment and typical consumption quality, with respect to the historical evolution. The models of individual categories were created with the help of PSCAD simulation software. A system of control and power parametrization of models was also designed, based on the outer description, i. e. parameters of locomotives, line profile and the driving dynamics. Thus, the designed models are suitable for the simulation of energy flow profile in the traction system as a whole.

Keywords

Power system conversion, electric traction system, quality consumption, locomotive, equation of motion, PSCAD.

Bibliografická citace

BUREŠ, Jan *Elektrické modely rekuperačních zátěží pro napaječ střídavého trakčního vedení 25 kV, 50 Hz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2022. 78 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Klusáček.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jan Bureš*

VUT ID studenta: *220755*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: Elektrické modely rekuperačních zátěží
pro napáječ střídavého trakčního vedení 25 kV, 50 Hz

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janovi Klusáčkovi za pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Poděkování projektu

Tato bakalářská práce vznikla v Centru výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie (CVVOZE) za finanční podpory TAČR v rámci projektu č. CK02000099 „Pilotní projekt napájení trakčního vedení měniči AC/AC“.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. PŘEHLED TYPŮ NAPÁJENÍ TRAKČNÍ SOUSTAVY	14
1.1 NAPÁJENÍ TRAKČNÍ SOUSTAVY 3 kV.....	14
1.2 NAPÁJENÍ TRAKČNÍ SOUSTAVY 25 kV 50 Hz.....	15
1.2.1 <i>Napájení pomocí transformátoru 110/27 kV</i>	15
1.2.2 <i>Měničové napájecí stanice</i>	17
1.3 KONVERZE NAPÁJENÍ ZE SYSTÉMU 3 kV NA SYSTÉM 25 kV	19
2. DEFINICE PARAMETRŮ KVALITY ODBĚRU	20
2.1 SYMETRIE/NESYMETRIE	20
2.2 VYŠŠÍ HARMONICKÉ A ČINITELÉ HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ.....	21
2.3 ÚČINÍK 1. HARMONICKÉ A CELKOVÝ ÚČINÍK ODBĚRU	22
3. TECHNOLOGIE MĚNIČŮ PROVOZOVANÝCH LOKOMOTIV A JEJICH VLIV NA SÍŤ 25	
3.1 DVOUCESTNÝ MŮSTKOVÝ USMĚRŇOVAČ S KONDENZÁTOREM.....	26
3.2 PULZNÍ MĚNIČ	27
3.3 AKTIVNÍ JEDNOFÁZOVÝ USMĚRŇOVAČ	28
3.4 TROJFÁZOVÝ STŘÍDAČ.....	29
3.5 FREKVENČNÍ MĚNIČ	30
4. KATEGORIZACE LOKOMOTIV PRO MODELOVÁNÍ	31
4.1 LOKOMOTIVA 1	31
4.2 LOKOMOTIVA 2	31
4.3 LOKOMOTIVA 3	32
5. PARAMETRIZACE LOKOMOTIV, TVORBA MODELŮ LOKOMOTIV, VÝSTUPNÍ HODNOTY SIMULACE	33
5.1 MODELOVÁNÍ A SIMULACE LOKOMOTIV.....	36
5.1.1 <i>Lokomotiva 1</i>	37
5.1.2 <i>Lokomotiva 2</i>	39
5.1.3 <i>Lokomotiva 3</i>	42
5.2 KNIHOVNA LOKOMOTIV V PSCADU	50
6. TVORBA MODELU TRATĚ	53
6.1 JEDNOSTRANNÉ NAPÁJENÍ	53
6.2 DVOUSTRANNÉ NAPÁJENÍ.....	55
7. DYNAMIKA PROVOZU	56
7.1 1 LOKO – 1 NAPAJEČ	56
7.2 1 LOKO – 2 NAPAJEČE	63
7.3 2 LOKO – 1 NAPAJEČ	67
7.4 2 LOKO – 2 NAPAJEČE	72

7.5	SCÉNÁŘ PODLE REÁLNÉHO GRAFIKONU	76
8.	ZÁVĚR.....	78
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
	LITERATURA.....	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Schéma rozvodny 110 kV v trojfázovém zapojení a části rozvodny 27 kV v jednofázovém zapojení, překresleno z [3].	15
2	Zapojení transformátorů do T, překresleno z [3].	16
3	Zapojení transformátorů do V, překresleno z [3].	17
4	Schematické zobrazení napájení trakční soustavy pomocí transformátoru 110/27 kV, překresleno z [21].	18
5	Schematické zobrazení napájení trakční soustavy pomocí měničové napájecí stanice, překresleno z [21].	18
6	Jednotlivé přeměny elektrické energie pomocí měničů výkonové elektroniky, překresleno z [9].	25
7	Diagram ω -M pro trakční účely, překresleno z [22].	26
8	Schéma zapojení dvoucestného můstkového usměrňovače, překresleno z [9].	27
9	Schéma zapojení měniče typu Step-Down a měniče typu Full Bridge, překresleno z [16].	28
10	Schéma zapojení trojfázového střídače, překresleno z [16].	29
11	Schéma zapojení frekvenčního měniče, překresleno z [17].	30
12	Momentová charakteristika včetně závislosti mechanického výkonu na úhlové rychlosti nápravy lokomotivy řady 242.	34
13	Zjednodušené schéma trakčního silového obvodu Loko 1.	37
14	Detail průběhu odebíraného proudu Loko 1 při využití plného počtu odboček.	39
15	Harmonické spektrum průběhu odebíraného proudu.	39
16	Zjednodušené schéma trakčního silového obvodu Loko 2.	40
17	Detail průběhu odebíraného proudu Loko 2 při spínací frekvenci 300 Hz.	41
18	Harmonické spektrum průběhu odebíraného proudu.	41
19	Zjednodušené schéma trakčního silového obvodu Loko 3.	42
20	Regulační smyčka napětí stejnosměrného meziobvodu, překresleno z [9].	43
21	Regulační smyčka proudu sekundárního vinutí transformátoru, překresleno z [9].	44
22	Fázový závěs, překresleno z [9].	45
23	Řídicí struktura jednofázového aktivního usměrňovače u Loko 3, Q^* je žádaný jalový výkon sekundárního vinutí transformátoru, ωL je reaktance vstupního filtru, překresleno z [9].	46
24	Detail průběhu odebíraného proudu Loko 3 při spínací frekvenci 800 Hz.	47
25	Harmonické spektrum průběhu odebíraného proudu.	47
26	Omezení dodávky výkonu do trakčního vedení jednotkou ICE 7.	48
27	Měření $\frac{1}{4}$ skutečného mechanického výkonu hnacího vozidla.	49
28	Měření celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení.	49
29	Rekuperace elektrické jednotky 640.	50
30	Obecné modely lokomotiv s příslušnou pohybovou rovnicí v knihovně lokomotiv.	51
31	Modely lokomotiv ze skupiny Loko 1 s příslušnými pohybovými rovnicemi v knihovně lokomotiv.	52
32	Model tratě s jednostranným napájením.	53
33	Příklad průběh ujeté vzdálenosti vlaku pro parametrizaci impedance Z_1 a Z_2 .	54
34	Model tratě s dvoustranným napájením.	55
35	Model tratě s jednostranným napájením a provozem vlaku s lokomotivou řady 362.	56
36	Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení.	57
37	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.	58
38	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.	58
39	Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.	59
40	Model tratě s jednostranným napájením a provozem vlaku s lokomotivou řady 380.	60
41	Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení.	60

42	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.	61
43	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.	62
44	Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.	62
45	Model tratě s dvoustranným napájením a provozem vlaku s lokomotivou řady 362.	63
46	Průběh odebíraného výkonu trakčního napaječe v podobě statického měniče.	64
47	Průběh odebíraného výkonu trakčního napaječe v podobě jednofázového transformátoru.	64
48	Průběh celkového odebíraného výkonu.	65
49	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.	65
50	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.	66
51	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom III.	66
52	Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.	67
53	Model tratě s jednostranným napájením a provozem vlaků s lokomotivou řady 362 a lokomotivu řady 380.	68
54	Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu vlaků s lokomotivami řady 362 a 380.	69
55	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.	69
56	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.	70
57	Průběh celkového odebíraného proudu a spektrum průběhu pro Zoom III.	70
58	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom IV.	71
59	Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.	72
60	Model tratě s dvoustranným napájením a provozem vlaků s lokomotivou řady 362 a lokomotivu řady 380.	72
61	Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu vlaků s lokomotivami řady 362 a 380.	73
62	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.	73
63	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.	74
64	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom III.	74
65	Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom IV.	75
66	Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.	76
67	Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu nákladního vlaku dle grafikonu vlakové dopravy.	77

SEZNAM TABULEK

1	Parametrizace hnacích vozidel, zjištěno z [25][26].	33
2	Parametrizace osobních a nákladních vozů.	33
3	Dodávka proudu z proudového zdroje pro jednotlivá vozidla.	48

ÚVOD

Hlavním cílem bakalářské práce je syntéza modelů představující reálná drážní elektrická vozidla, simulující zátěž trakčního vedení v úseku tratě Nedakonice-Říkovice, využívající novou technologii napájecího měniče.

Hlavní motivací bakalářské práce je nasazení nové technologie napájení trakční soustavy v podobě statických měničů. Lze tak řídit energetické toky, jejich kvalitu směrem do distribuční sítě (DS) a eliminovat vliv nesymetrie v DS. Z hlediska provozu trakční sítě jsou přednostmi statických měničů především eliminace neutrálních úseků u střídavé trakční soustavy, eliminace nemožnosti rekuperace do DS ve stejnosměrné trakční soustavě a možnost koordinace více jednotek. Díky možnosti simulace reálného provozu je možné sledovat jak energetické toky v důsledku provozu, tak i odběr hnacích vozidel na trakčním vedení na úrovni kvality odběru. Pro dostatečnou názornost principu chování hnacích vozidel je jejich realizace provedena v simulačním programu PSCAD s možností exportu průběhů odebíraného proudu jednotlivých drážních vozidel.

Bakalářská práce je členěna do sedmi kapitol. První kapitola popisuje přehled typů napájení trakční soustavy v České republice, rozdělení na napájení trakční soustavy podle typu a velikosti napětí, výhody a nevýhody jednotlivých systémů a důvody konverze napájení ze systému 3 kV na střídavý systém 25 kV/50 Hz. Dále jsou uvedeny základní parametry kvality trakčního odběru, které jsou při simulaci provozu hnacích vozidel posuzovány. Další částí je popis základních technologií nejběžnějších měničů provozovaných lokomotiv a jejich vliv na síť. Čtvrtá kapitola pojednává o kategorizaci lokomotiv pro modelování, jejich odlišné trakční výzbroji a důvodu výběru právě zmínovaných lokomotiv pro simulaci. V páté kapitole je referováno o parametrizaci zvolených lokomotiv, samotné realizaci modelů v simulačním programu a výstupních hodnotách ze simulace, které posuzují kvalitu odběru jednotlivých lokomotiv. Šestá kapitola popisuje modely tratě s využitím jednostranného a dvoustranného napájení. V poslední kapitole jsou detailně popsány čtyři varianty scénáře provozu, kde je kladen důraz na kvalitu odběru hnacích vozidel, vzájemné ovlivnění vozidel při společném provozu a vliv trakčních vozidel na DS od napěťové hladině 110 kV. Dále je zde uveden příklad provozu vlaku dle grafikonu vlakové dopravy.

1. PŘEHLED TYPŮ NAPÁJENÍ TRAKČNÍ SOUSTAVY

Trakční soustavou je rozuměn soubor zařízení, kterým je zajištěna dodávka elektrické energie z DS k trakčním vozidlům. V České republice jsou zavedeny tři soustavy pro napájení trakčních vozidel závislé trakce. Jedná se o systém stejnosměrného proudu o napětí 3 kV, systém střídavého proudu o napětí 25 kV, 50 Hz a systém stejnosměrného proudu o napětí 1,5 kV, který je v České republice omezen pouze na jednu trať. Pro napájení trakčních soustav jsou využity trakční napájecí stanice. Tyto stanice jsou tedy schopny transformovat parametry elektrické energie přiváděné z DS k napáječům trakčního vedení. Trakční napájecí stanice jsou rozděleny podle účelu na trakční měnirny a trakční transformovny. V následujících kapitolách budou uvedeny způsoby napájení trakčních soustav 3 kV stejnosměrného proudu a 25 kV, 50 Hz střídavého proudu z příslušných napájecích trakčních stanic [1][2].

1.1 Napájení trakční soustavy 3 kV

Stejnosemnná napájecí soustava o napětí 3 kV je napájena z měnirny. Už z názvu plyne, že měnirna využívá prvků pro změnu parametrů elektrické energie mezi DS a trakčním vedením, konkrétně transformuje trojfázové střídavé napětí DS na stejnosměrné napětí trakční soustavy [2].

Pro snížení a usměrnění trojfázového střídavého napětí jsou měnirny vybaveny rozvodnou velmi vysokého napětí (VVN), rozvodnou vysokého napětí (VN), usměrňovací skupinou a rozvodnou stejnosměrného napětí. Rozvodna VVN je spojena s DS 110 kV pomocí dvou trojfázových transformátorů s terciárním vinutím, které napájí filtr pro kompenzaci třetí harmonické složky proudu. Tyto transformátory provádí snížení trojfázového napětí DS z hladiny 110 kV na hladinu VN (22 kV), kterou je napájena rozvodna VN. V rozvodně VN dochází k distribuci elektrické energie pro napájení usměrňovací skupiny, která se skládá z transformátoru a usměrňovačů. Součástí je také napájení zabezpečovacího zařízení na napěťové hladině 6 kV a napájení vlastní spotřeby. V usměrňovací skupině je provedena transformace trojfázového napětí 23 kV na napětí 3,3 kV, typicky pomocí trojvinutového transformátoru, jehož sekundární vinutí jsou připojena k usměrňovačům. Pro napájení stejnosměrné drážní trakce se často využívá topologie se zapojením dvou trojfázových šestipulzních usměrňovačů, které jsou připojeny na jednotlivá sekundární vinutí trojvinutového transformátoru, dohromady tvořící dvanáctipulzní usměrňovač. Tato topologie je oproti šestipulznímu usměrňovači výhodná zejména 1) z hlediska možnosti minimalizovat zvlnění napětí stejnosměrného meziobvodu bez drastického navyšování kapacity vyhlazovacích kondenzátorů a 2) z hlediska kvalitativně lepšího průběhu odebíraného proudu, tzn. menší obsah vyšších harmonických složek.

Posledním článkem měničny je rozvodna stejnosměrného napětí, kde je stejnosměrné napětí 3,3 kV přes rychlovypínače přivedeno na jednotlivé napaječe. Samotné napájení trakčního vedení je realizováno na napěťové hladině 3,3 kV s tolerancí ± 300 V. Prakticky tak lze s ohledem na úbytek napětí a odpor trakčního vedení zajistit jednotkový odběr až 10 MW [1][2].

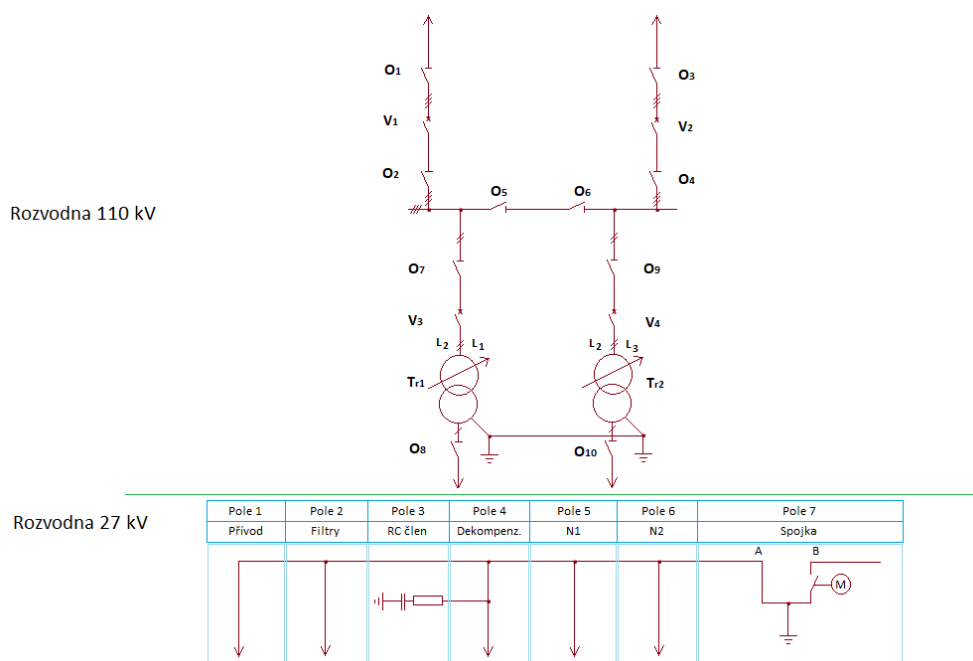
1.2 Napájení trakční soustavy 25 kV 50 Hz

Hlavní předností střídavé napájecí soustavy 25 kV je oproti stejnosměrné trakční soustavě schopnost napájet lokomotivy o větším jednotkovém výkonu, který se dle [3] odvíjí od výkonu trakčních transformátorů (12,5 - 16 MVA). Navíc lze trakční síť provozovat synchronně s DS, použít jednofázové transformátory namísto usměrňovačů, a tím redukovat náklady na vybavení napájecích stanic. Na druhou stranu odebíraný proud je nesymetrický a maximální odběr je limitován napěťovou nesymetrií, kterou způsobuje. V následujícím jsou detailně popsány způsoby napájení [2].

1.2.1 Napájení pomocí transformátoru 110/27 kV

Jedná se o starší koncepci trakční transformovny, která plní účel snižování napětí rozvodné soustavy na napěťovou úroveň vhodnou pro napájení trakčního vedení [2].

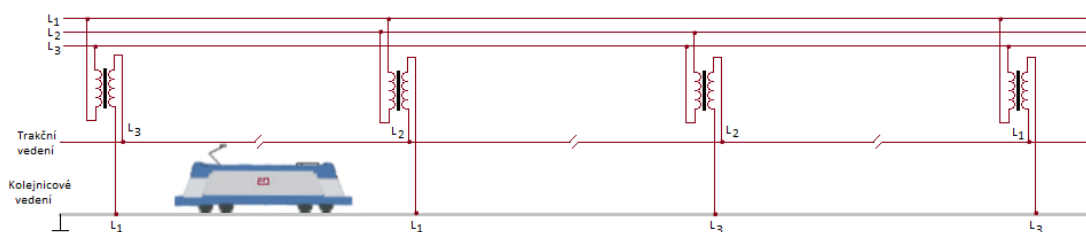
Podobně jako u měnění je trakční transformovna vybavena rozvodnou VVN, která je připojena do DS s napěťovou úrovní 110 kV pomocí dvou olejových transformátorů. Jeden z nich slouží jako záložní v případě poruchy.



Obrázek 1 Schéma rozvodny 110 kV v trojfázovém zapojení a části rozvodny 27 kV v jednofázovém zapojení, překresleno z [3].

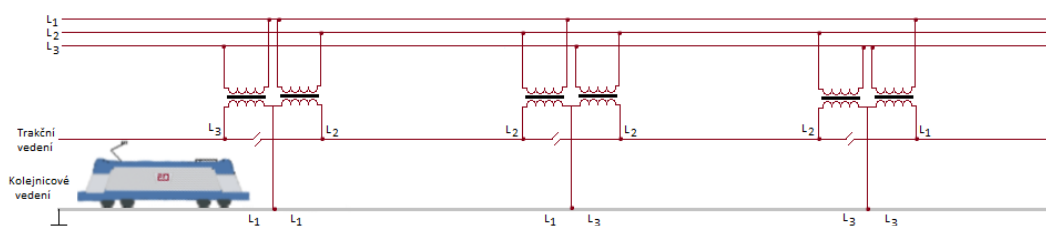
Jeden vývod sekundárního vinutí těchto dvou transformátorů je napojen na trakční vedení přes dělenou přípojnicí A B rozvodny 27 kV. Přípojnicí A (viz. obrázek 1) je napájeno 7 polí, z nichž 2 slouží jako přívod k napáječům trakčního vedení N1 a N2. Pole 4 zajišťuje kompenzaci indukčního jalového výkonu prostřednictvím filtračně-kompenzačního zařízení a RC členu a pole 2 obsahuje zařízení pro filtraci vyšších harmonických složek proudu. Druhý vývod sekundárního vinutí je spojen s kolejnicovým vedením [2][3].

Z důvodu hustě rozvětvené DS s napětovou úrovní 110 kV jsou transformátory v rozvodně VVN u konvenčních trakčních transformoven provedeny dvojího druhu. Prvním zapojením transformátorů 110/27 kV je tzv. zapojení do T. Tohoto zapojení se v současnosti téměř nevyužívá, a to z důvodu velké nesymetrie v DS, která je způsobena napájením úseku vedení pouze z jednoho transformátoru. Jednotlivé úseky vedení jsou od sebe odděleny tzv. neutrálním polem z důvodu napájení sousedních úseků sdruženým napětím mezi odlišnými fázemi vedoucí k odlišnému úhlu napětí úseků. Z této skutečnosti plyne, že dva sousední úseky nesmí být vodivě propojeny např. sběračem hnacího vozidla kvůli vzniku vyrovnávacích proudů mezi dvěma sousedními transformátory. Primární vinutí transformátoru je zapojeno na dvě fáze DS o napětové hladině 110 kV, což znamená, že při odběru trakčním vozidlem v příslušném úseku jsou zatíženy pouze tyto dvě fáze [2].



Obrázek 2 Zapojení transformátorů do T, překresleno z [3].

Druhým způsobem zapojení a dodnes využívaným je zapojení transformátorů do V, které přináší výhodu v omezení nesymetrie v rozvodné soustavě na polovinu oproti předchozímu zapojení. Rozdíl zapojení transformátorů spočívá ve spojení těch vývodů sekundárního vinutí, které jsou připojeny ke kolejnicovému vedení. Tímto způsobem je zajištěno napájení daného úseku jedním transformátorem. Pokud bychom navíc transformátory k DS zapojili cyklicky, dosáhli bychom větší symetrizace v rozvodné soustavě o napětové hladině 110 kV [2].



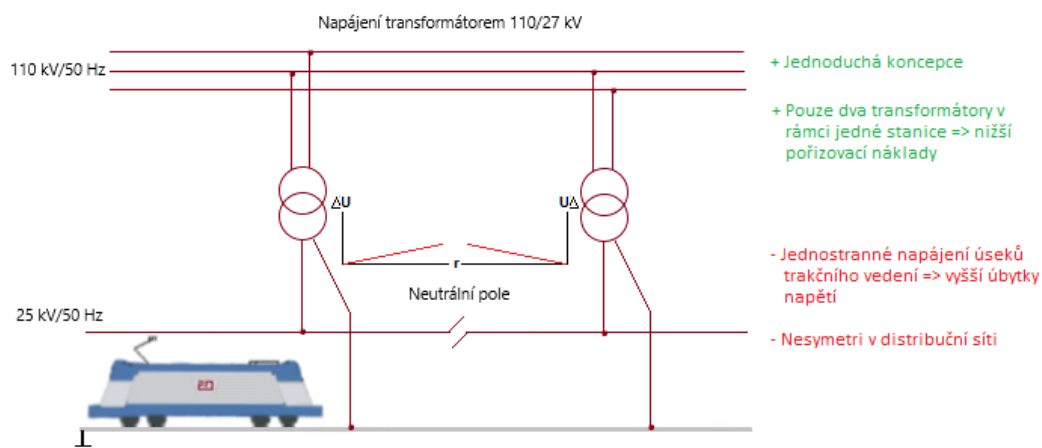
Obrázek 3 Zapojení transformátorů do V, překresleno z [3].

V porovnání s měnírnami mají konvenční trakční transformovny jednodušší konstrukci, ve které jsou základem pouze dva transformátory 110/27 kV, ale problém spočívá v jednostranném napájení jednotlivých úseků trakčního vedení, což vede k vyšším úbytkům napětí rostoucím směrem od transformovny. Dále na úrovni VVN v DS vzniká nesymetrie, která se šíří do nižších napěťových hladin. Tento problém je závažnější při rekuperaci elektrické energie [2][4].

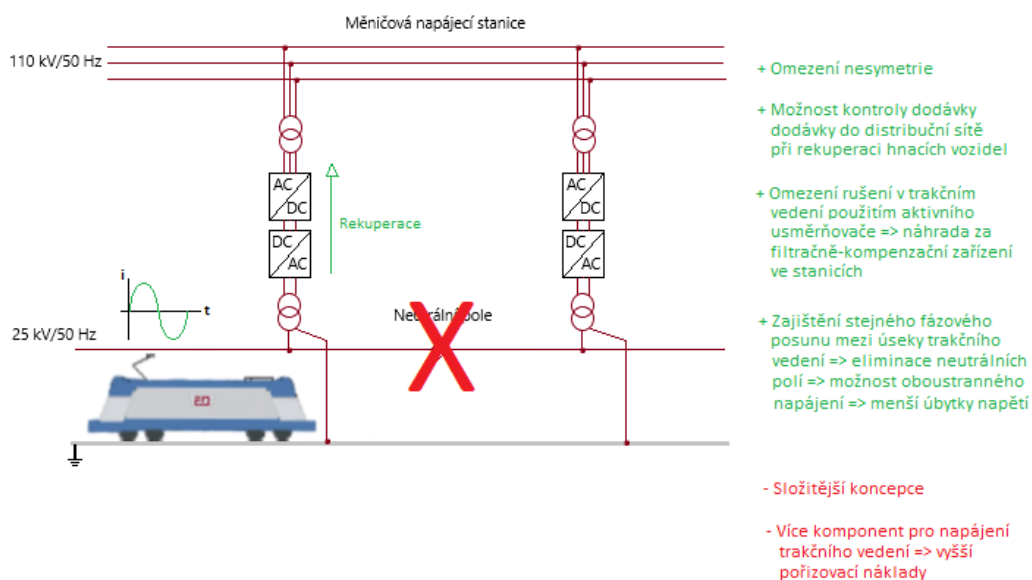
1.2.2 Měničové napájecí stanice

Měničové napájecí stanice využívají původní jednofázový transformátor 110/27 kV pouze pro synchronizaci s DS nebo jako záložní transformátor. Pro nový způsob napájení trakčního vedení je stanice doplněna sestavou nového trojfázového transformátoru 110/27 kV, čtyřkvadrantového měniče a jednofázového transformátoru napojeného na trakční vedení. Vstupní stranu stanice tedy tvoří transformátor připojený k DS 110 kV, který snižuje napěťovou úroveň rozvodné soustavy na aktivní usměrňovač. Dále přes střídač a jednofázový transformátor je přivedena energie do trakčního vedení [5][6].

Hlavní přednost měničových napájecích stanic spočívá v samotném použití aktivního usměrňovače, který významně omezuje rušení z trakční soustavy a může být nahrazeno filtračně-kompenzační zařízení pro filtrování vyšších harmonických. Dalšími výhodami jsou např. omezení nesymetrie, možnost kontroly dodávky energie z hnacích vozidel při jejich rekuperaci do DS, vyřazení neutrálních polí mezi jednotlivými úseky trakčního vedení při vzájemné součinnosti několika stanic díky zajištění stejného fázového posunu mezi jednotlivými úseky trakčního vedení a oboustranné napájení trakčního vedení [5][7].



Obrázek 4 Schematické zobrazení napájení trakční soustavy pomocí transformátoru 110/27 kV, překresleno z [21].



Obrázek 5 Schematické zobrazení napájení trakční soustavy pomocí měničové napájecí stanice, překresleno z [21].

1.3 Konverze napájení ze systému 3 kV na systém 25 kV

Stejnosemnnou trakční soustavou o napěťové hladině 3 kV je elektrifikována severní část ČR, tedy přibližně polovina našeho území. Jižní část ČR je tvořena střídavou trakční soustavou o napěťové úrovni 25 kV 50 Hz [3].

Výhodou stejnosměrné trakční soustavy, oproti střídavému napájecímu systému, jsou např. nižší nároky na izolátory díky nižší napěťové hladině, eliminace neutrálních polí a možnost oboustranného napájení trakčního vedení. V důsledku toho jsou zajištěny nižší úbytky napětí na trakčním vedení při provozu. Stejnosemnné trakční soustavy ale také vykazují, oproti střídavému napájecímu systému, řadu nevýhod [3].

K jedné z nevýhod patří odběr až osminásobně větších proudů pro dosažení stejného výkonu elektrických lokomotiv jako u soustavy střídavého napětí 25 kV. V důsledku toho vznikají na trakčním vedení relativně velké ztráty, což vede k vyšším pořizovacím nákladům proudovodných drah na větší průřezy (trolejí, přípojníc), nebo snížení jednotkového výkonu lokomotivy. S větším odběrem proudu trakčních vozidel dochází k výrazným poklesům napětí v troleji stejnosměrné trakce, čímž může nastat problém u těžkých vozeb, hlavně při rozjezdu. Z hlediska nižší napěťové hladiny 3 kV oproti hladině 25 kV střídavého napětí je zapotřebí stavby trakčních měnících s menšími rozestupy z důvodu úbytků napětí na délce úseku trakčního vedení mezi jednotlivými stanicemi [3][4].

Dalším problémem stejnosměrného napájení je zpětný proud, který se často uzavírá mimo hlavní proudovodnou dráhu, kolejnici. To způsobuje nejen vyšší korozi traťových komponent, ale také vznikají tzv. bludné proudy, které mohou například způsobovat nebezpečná dotyková napětí na okolních kovových objektech. Tento problém je dán charakterem stejnosměrného proudu [2].

Trakční soustava střídavého napětí 25 kV 50 Hz díky svým vlastnostem většinu nedostatků eliminuje. Z důvodu vyšší napěťové hladiny, oproti stejnosměrnému trakčnímu systému, je dosaženo nižších hodnot odebíraného proudu při stejném výkonu hnacích vozidel nebo vyššího výkonu při stejné kvantitě odebíraného proudu jako u stejnosměrného systému. To má za následek využití menších průřezů trolejového vedení, což vede na nižší pořizovací náklady proudovodných drah. Vlivem nižších odběrů proudů jsou zajištěny nižší poklesy napětí v trolejovém vedení, čímž je střídavá trakční soustava hodnocena jako tvrdší zdroj napětí. U tohoto trakčního systému je dovoleno také rozmístění trakčních transformoven s většími rozestupy, protože dovolený úbytek napětí na trakčním vedení je dodržen i na větších vzdálenostech díky vyšší napěťové hladině, tedy 25 kV [3][4].

2. DEFINICE PARAMETRŮ KVALITY ODBĚRU

V této kapitole budou popsány relevantní parametry kvality trakčního odběru, jejichž kvantitativní zhodnocení je závislé na provozu a konkrétních typech elektrických drážních vozidel.

2.1 Symetrie/nesymetrie

Nesymetrií je rozuměn stav v trojfázové soustavě, kdy nerovnoměrným zatížením jednotlivých fází dochází k úbytkům napětí různých velikostí a úhlů. V takovém případě napěťová nesymetrie způsobuje větší ohřevy transformátorů a zvýšený odběr třífázových spotřebičů, zejména asynchronních motorů [7].

Trojfázovou soustavou, kde dochází k nesymetrii, je pro napájení trakční soustavy 25 kV 50 Hz DS o napěťové úrovni 110 kV. K nerovnoměrnému zatížení DS dochází při provozu hnacích vozidel, která odebírají proud z trakčního vedení pokaždé v jiném napájecím úseku, jak již bylo zmíněno v kap.1.2. Nesymetrii v třífázové DS lze popsat pomocí tří složek napětí a proudu. Jsou jimi sousledná, zpětná a netočivá složka. Pro proudy platí:

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_{AI} + \bar{I}_{AII} + \bar{I}_{A0} \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BI} + \bar{I}_{BII} + \bar{I}_{B0} \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CI} + \bar{I}_{CII} + \bar{I}_{C0},\end{aligned}\tag{1}$$

kde $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$ a $\bar{I}_C$ jsou fázory proudů jednotlivých fází A, B, C, index I je pro souslednou složku proudu, index II je pro zpětnou složku proudu a index 0 je pro netočivou složku proudu. Mezi jednotlivými složkami je dán vzájemný vztah operátorem natočení

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_I \\ \bar{I}_{II} \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix},\tag{2}$$

kde $\bar{a}$ je operátor natočení, který je roven $1 \cdot e^{j120^\circ}$, $\bar{I}_I$ je fázor sousledné složky proudu první harmonické, $\bar{I}_{II}$ je fázor zpětné složky proudu první harmonické a $\bar{I}_0$ je fázor netočivé složky proudu první harmonické. Matice pro napětí bude ve stejném znění. Součinitel nesymetrie proudu i_2 a nesymetrie napětí u_2 je potom dán poměrem velikosti zpětné složky proudu na první harmonické I_{II} , velikosti sousledné složky proudu na první harmonické I_I a velikostí zpětné složky napětí na první harmonické U_{II} , velikostí sousledné složky napětí na první harmonické U_I

$$i_1 = \frac{I_{II}}{I_I} \quad (3)$$

$$u_2 = \frac{U_{II}}{U_I}.$$

Pro DS jsou stanoveny normované limity, které nesmí být překročeny. Např. ČSN EN50160 doporučuje napěťovou nesymetrii maximálně 2 % [2][8].

Problémy s nesymetrií jsou řešeny například nasazením tzv. řízených balancérů. Jsou tvořeny třemi indukčnostmi zapojených do trojúhelníka, kde každá indukčnost je opatřena polovodičovým spínačem. Princip činnosti spočívá ve vhodném spínání polovodičových prvků, čímž dochází k rovnoměrnému rozložení odebíraného proudu ve všech fázích DS [4].

2.2 Vyšší harmonické a činitelé harmonického zkreslení

Harmonický průběh napětí a proudu jsou ideálním stavem a z praktického hlediska se jedná spíše o matematickou hypotézu. Reálné průběhy v energetických rozvodných zařízeních však touto vlastností nedisponují a svojí podobou se mohou pouze limitně blížit k ideálnímu harmonickému průběhu. Každý takový reálný průběh, který je, byť jen minimálně, odlišný (zkreslený) od ideálního harmonického průběhu, obsahuje vyšší harmonické složky napětí a proudu. Především provoz jednofázové rozvodné sítě je nejeefektivnější, a proto je snahou omezit tyto vyšší harmonické. Průběh odebíraného proudu je závislý na typu zátěže. Typy zátěží pro střídavé obvody lze rozdělit na lineární (obecná RLC zátěž) a nelineární zátěž [11].

Nejjednodušším příkladem lineární zátěže je rezistor s parametrem elektrický odpor. Tento odpor je konstantou úměry mezi napětím a proudem v obvodu, čímž podle Ohmova zákona určuje, kolikrát je amplituda proudu menší oproti amplitudě napětí. Tvar průběhu proudu však kvalitativně odpovídá napájecímu napětí. Pokud však bude napájecí napětí vykazovat zkreslený průběh, proud bude také zkreslený [11].

U nelineárních zátěží průběh proudu neodpovídá průběhu napětí. Při použití nelineární zátěže dochází ke zkreslení průběhu proudu, což je dáno vlastnostmi zátěže, kdy je nyní činný odpor zátěže závislý na několika veličinách. Takovou zátěží mohou být různé měniče s polovodičovými prvky, např. diodové usměrňovače, pulzní stejnosměrné měniče, čtyřkvadrantové měniče, které jsou v elektrických lokomotivách obsaženy. Zkreslený tvar průběhu proudu již neodpovídá harmonickému průběhu. Takový průběh proudu je možno rozložit pomocí Fourierovy řady na několik harmonických složek o různé amplitudě a frekvenci včetně stejnosměrné složky. Neharmonický průběh proudu tedy obsahuje kromě první harmonické složky ještě tzv. vyšší harmonické složky, kde řád harmonické složky je dán celistvým násobkem frekvence základní harmonické. V praxi jsou co do amplitudy dominantní 3., 5. a 7. harmonická složka, které způsobují velké zkreslení tvaru odebíraného proudu. Důležitým parametrem pro zjišťování kvality

z hlediska vyšších harmonických je činitel harmonického zkreslení proudu THD_I , který určuje, do jaké míry se liší zkreslený průběh proudu od harmonického průběhu proudu

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}, \quad (4)$$

kde h označuje řád harmonické složky a I_h jsou efektivní hodnoty proudu jednotlivých harmonických složek. Jedná se tedy o obecný parametr, který pouze vyjadřuje poměr vyšších harmonických složek proudu vztažených na základní harmonickou proudu. Existují ovšem i limity vyšších harmonických složek, které jsou předepsány normou. Pakliže nejsou tyto normované meze dodrženy, je využito filtračně-kompenzačního zařízení pro redukci nežádoucích vyšších harmonických složek. Z důvodu proměnlivé frekvence sítě, kdy není udržována stabilní hodnota 50 Hz, vznikají při provozu lokomotiv s měniči i meziharmonické složky proudu, které tak nejsou celistvým násobkem frekvence základní harmonické. V takovém případě je k vyjádření kvality odebíraného proudu činitel harmonického zkreslení THD_I nedostatečný a dle normy IEC 61000-2-4 [10] je zaveden činitel zkreslení TDR . Tento činitel zkreslení zahrnuje vyšší harmonické i meziharmonické složky odebíraného proudu a je dán

$$TDR = \frac{\sqrt{I_{ef}^2 - I_1^2}}{I_1}, \quad (5)$$

kde I_{ef} je efektivní hodnota proudu a I_1 je efektivní hodnota proudu první harmonické [10][8][12].

2.3 Účinník 1. harmonické a celkový účinník odběru

Obecná RLC zátěž představuje kombinaci prvků rezistoru, cívky a kondenzátoru. U takové kombinace prvků je chování obvodových veličin obdobné jako u lineární zátěže, ale je zde navíc uvažován odpor cívky a kondenzátoru, který je závislý na frekvenci v obvodu. O takovou hodnotu odporu je amplituda proudu ještě více snížena a fáze proudu je navíc posunuta o -90° u cívky a o $+90^\circ$ u kondenzátoru oproti napětí. Tvar průběhu proudu je nicméně stále zachován [11].

Pro takovou zátěž existují tři základní veličiny, které charakterizují energii v celkovém systému. Jsou jimi činný výkon, jalový výkon a zdánlivý výkon. Činný výkon je charakterizován jako střední hodnota okamžitého výkonu a dodává užitečnou elektrickou energii do zátěže

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt, \quad (6)$$

kde T je perioda síťového kmitočtu a $p(t)$ je okamžitý výkon. Činný výkon je přenášen pouze stejnými frekvenčními složkami proudu a napětí. Je-li napětí také neharmonické, je činný výkon P přenášen i na vyšších harmonických složkách napětí a proudu

$$P = \sum_{h=0,1,2,3,\dots}^H U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) , \quad (7)$$

kde h je řád harmonické složky, U_h je efektivní hodnota napětí, I_h je efektivní hodnota proudu a $\cos(\varphi_h)$ je účinník při dané harmonické složce. Pokud je napětí harmonické, je činný výkon P_1 přenášen pouze na první harmonické

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) , \quad (8)$$

kde U_1 je efektivní hodnota napětí první harmonické, I_1 je efektivní hodnota proudu první harmonické a $\cos(\varphi_1)$ je účinník na první harmonické [11][8][13].

Jalový výkon je část zdánlivého výkonu, který nepřenáší užitečnou práci, ale je mírou výměny energie v rámci elektrických a magnetických polí prvků v soustavě. Jalový výkon, podobně jako činný výkon, vzniká na stejných frekvenčních složkách napětí a proudu. Pokud je napětí neharmonické, jalový výkon vzniká i na vyšších harmonických složkách napětí a proudu

$$Q = \sum_{h=0,1,2,3,\dots}^H U_h \cdot I_h \cdot \sin(\varphi_h) , \quad (9)$$

kde h je řád harmonické složky, U_h je efektivní hodnota napětí, I_h je efektivní hodnota proudu a φ je fázový posun mezi napětím a proudem dané harmonické složky. Pokud je napětí harmonické, jalový výkon Q_1 vzniká pouze na první harmonické

$$Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) , \quad (10)$$

kde U_1 je efektivní hodnota napětí první harmonické, I_1 je efektivní hodnota proudu první harmonické a φ_1 je fázový posun mezi napětím a proudem na první harmonické [13].

Zdánlivý výkon je tvořen součinem efektivních hodnot napětí U_{ef} a proudu I_{ef} .

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} . \quad (11)$$

V případě existence vyšších harmonických je zdánlivý výkon navýšen o deformační výkon D , který obsahuje součiny napětí a proudů různých harmonických složek. Výsledný zdánlivý výkon je potom vyjádřen jako vektorový součet činného, jalového a deformačního výkonu:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 . \quad (12)$$

Pro první harmonickou lze zdánlivý výkon S_1 vyjádřit jako vektorový součet činného výkonu P_1 a jalového výkonu Q_1 pro první harmonickou

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 [13]. \quad (13)$$

Účinník první harmonické je definován jako poměr činného a zdánlivého výkonu první harmonické

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} , \quad (14)$$

kde P_1 je činný výkon první harmonické a Q_1 je jalový výkon první harmonické [13][14].

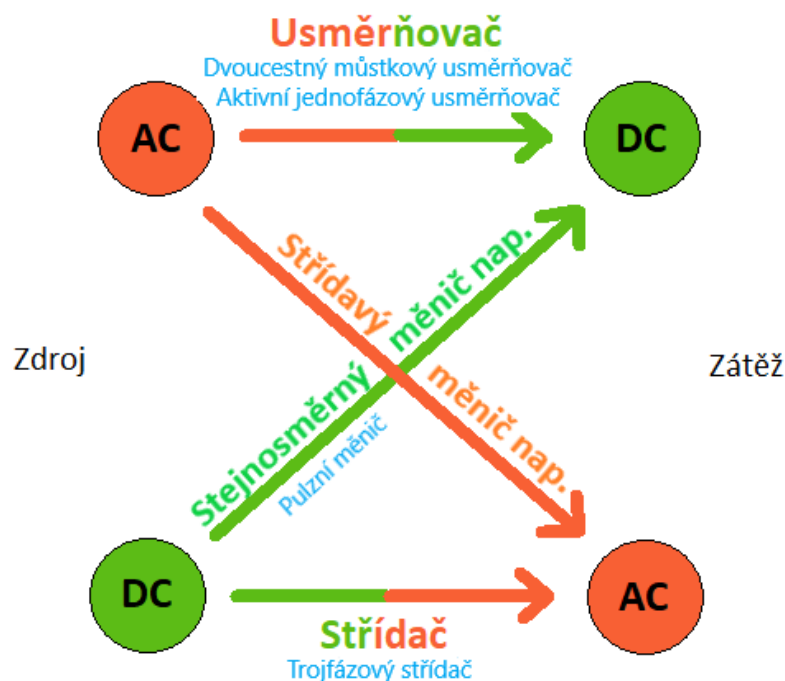
Kromě účinníku první harmonické je zaveden tzv. celkový účinník odběru λ , který navíc zohledňuje příspěvek efektivních hodnot proudů jednotlivých vyšších harmonických složek

$$\lambda = \frac{P}{S}, \quad (15)$$

kde P je činný výkon a S je zdánlivý výkon [13][14].

3. TECHNOLOGIE MĚNIČŮ PROVOZOVANÝCH LOKOMOTIV A JEJICH VLIV NA SÍŤ

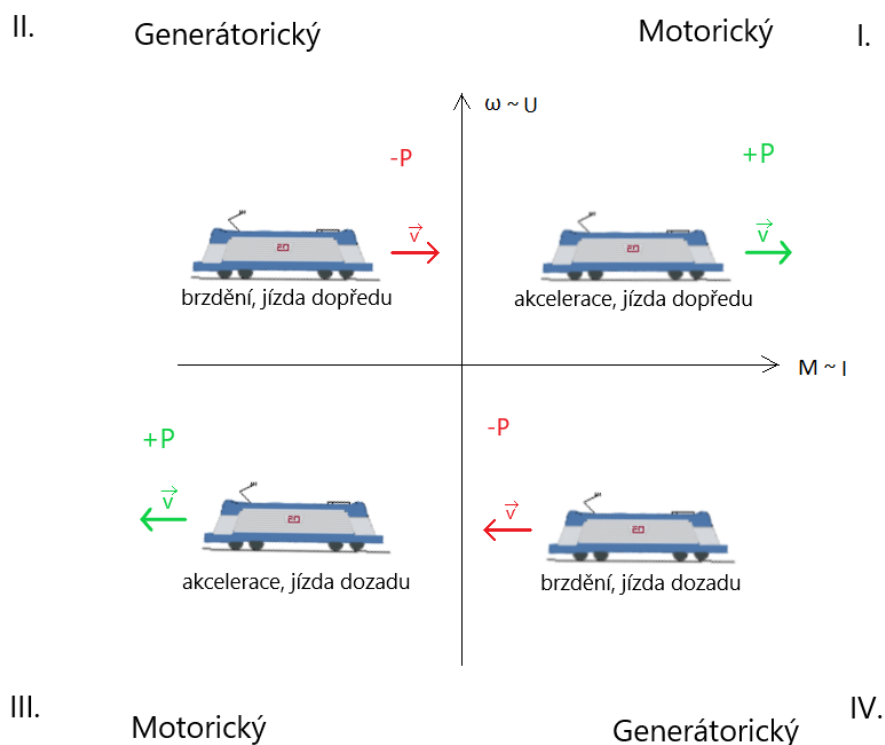
Měniče elektrické energie jsou zařízení, která umožňují měnit parametry napětí nebo proudu za účelem splnění požadavků pro danou aplikaci. Dochází k přeměně elektrické energie na elektrickou energii s jinými parametry proudu a napětí, jako je velikost a frekvence. Měniče jsou rozděleny na čtyři skupiny. První skupinou jsou měniče, které provádí změnu střídavého proudu na stejnosměrný proud (AC-DC měniče), často nazývané jako usměrňovače. Další skupinou jsou měniče, jejichž chování upravuje stejnosměrný proud na stejnosměrný proud různé úrovně napětí, tzv. DC-DC měniče neboli stejnosměrné měniče napětí. Třetí skupinu tvoří DC-AC měniče, které přeměňují stejnosměrný proud na střídavý proud, tzv. střídače, a poslední skupinu zaujímají měniče měnící střídavý proud na střídavý o požadované velikosti a frekvenci, tzv. AC-AC měniče neboli střídavé měniče napětí [9].



Obrázek 6 Jednotlivé přeměny elektrické energie pomocí měničů výkonové elektroniky, překresleno z [9].

Jedním z dalších parametrů, který rozlišuje použití konkrétního měniče pro danou aplikaci, je rozdělení měničů podle pracovních kvadrantů ω -M roviny. Při aplikacích, kde zátěží je elektrický motor, lze změnou polarity napětí a proudu měnit smysl momentu na hřídeli motoru a směr otáčení hřídele. Touto analogií lze konstatovat, že moment na hřídeli motoru je úměrný proudu zátěží a napětí na zátěži je úměrné úhlové

rychlosti otáčení hřídele motoru. I. a III. kvadrant tak odpovídá motorickému režimu, II. a IV. kvadrant odpovídá generátorickému režimu [16].

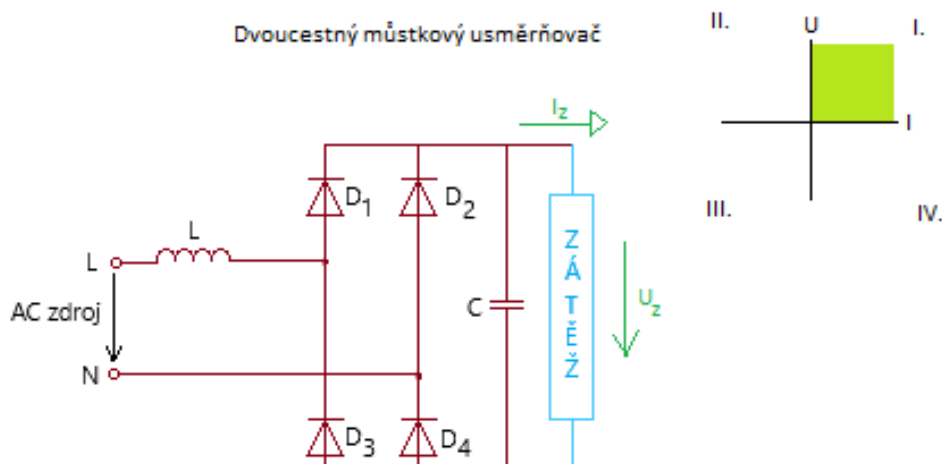


Obrázek 7 Diagram ω -M pro trakční účely, překresleno z [22].

V následujících kapitolách jsou uvedeny základní topologie nejčastějších měničů, které se vyskytují v provozovaných elektrických lokomotivách.

3.1 Dvoucestný můstkový usměrňovač s kondenzátorem

Jedná se o měnič, který slouží k přeměně střídavého napětí na stejnosměrné a je řazen do kategorie měničů pracujících v I. kvadrantu U-I roviny. Z této podstaty plyne schopnost měniče pracovat v režimu spotřebiče, tedy při kladném napětí na zátěži a odebírání proudu ze zdroje. K této činnosti jsou využity čtyři diody, které tvoří můstkové zapojení, na jehož výstupu je připojen kondenzátor. Jeho úkolem je vyhlazení usměrněného napětí, limitně na špičkovou hodnotu střídavého napětí [9][15][16].



Obrázek 8 Schéma zapojení dvoucestného můstkového usměrňovače, překresleno z [9].

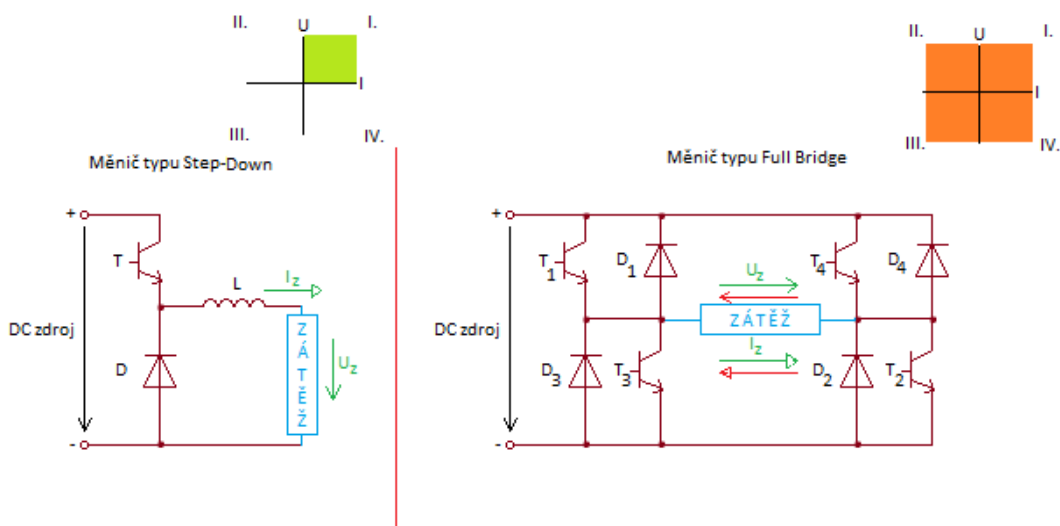
Tento typ usměrňovače působí negativně na napájecí síť z hlediska tvaru odebíraného proudu ze sítě, protože průběh proudu má charakter úzkých impulzů. Tento tvar proudu je způsoben odebráním energie ze sítě pro nabíjení kondenzátoru na špičkovou hodnotu fázového napětí sítě. Pokud kondenzátor disponuje velkou kapacitou, je průběh usměrněného napětí více vyhlazen, ale jsou odebrány strmější a užší impulzy proudu ze sítě. To je důsledek toho, že průběh odebíraného proudu není sinusový a obsahuje vyšší harmonické složky, které měnič emituje směrem do sítě, kde jsou vytvářeny úbytky napětí na impedancích sítě a dochází tak k deformaci napětí, které by bylo jinak harmonické. Pro degradaci proudových impulzů odebíraných ze sítě jsou využity přídavné indukčnosti, které snižují strmost proudu a vyhlazují jeho průběh. Pokud by ale byla použita příliš velká indukčnost, průběh odebíraného proudu by dosahoval obdélníkového tvaru. Dvoucestnými můstkovými usměrňovači disponují starší generace lokomotiv [3][16][18].

3.2 Pulzní měnič

Pulzní měnič je zařazen do kategorie DC-DC měničů, a tedy jejich úkol spočívá ve zvyšování nebo snižování úrovně stejnosměrného napětí, které vstupuje do měniče. Jeho činnost je využívána ve všech kvadrantech U-I roviny podle použité topologie daného měniče. Na obrázku 9 jsou pro ukázkou rozdílu zobrazeny typy měničů Step-Down a Full Bridge.

Pulzní měnič je vždy tvořen spínacím prvkem v podobě tranzistoru nebo tyristoru, diody a cívky pro akumulaci energie při spínání. Samotný princip pulzního měniče spočívá v přenosu činného výkonu do zátěže pomocí změny střední hodnoty výstupního napětí měniče. Řízení spínacího prvku je prováděno tzv. pulzní šířkovou modulací, kde poměrem dobou zapnutí a vypnutí spínacího prvku je určována střední hodnota

výstupního napětí v rámci modulační periody. Základem pulzní šířkové modulace je komparátor, který porovnává nízkofrekvenční modulační signál s nosným signálem na vyšší frekvenci a trojúhelníkového průběhu. Nízkofrekvenčním modulačním signálem může být signál o konstantní hodnotě nebo sinusový signál o frekvenci nižší, než má nosný signál. Poté se jedná o pulzní šířkovou modulaci, která se využívá pro DC-DC měniče, nebo o sinusovou pulzní šířkovou modulaci, kde se její uplatnění nachází u DC-AC měničů. U pulzních měničů je využíváno změny úrovně modulačního signálu, čímž dochází ke změně střidy výstupního signálu z komparátoru. Výstupním signálem jsou pulzy, které mají střidu tím větší, čím je vyšší úroveň modulačního signálu. Takové pulzy jsou poté přiváděny na hradlo spínacího prvku. Jestliže zvyšováním úrovně modulačního signálu dochází k nárůstu střidy generovaných pulzů, je navyšována také střední hodnota výstupního napětí z pulzního měniče, a tedy zvyšujeme výkon přiváděný do zátěže.



Obrázek 9 Schéma zapojení měniče typu Step-Down a měniče typu Full Bridge, překresleno z [16].

Starší lokomotivy pro provoz na napájecí soustavě 25 kV využívající pro řízení výkonu pulzní měniče, kde spínacím prvkem jsou tyristory, využívají pro usměrnění napětí dvoucestný usměrňovač, na jehož výstupu je umístěn zmiňovaný pulzní měnič se stejnosměrnými motory [14][15][16][20].

3.3 Aktivní jednofázový usměrňovač

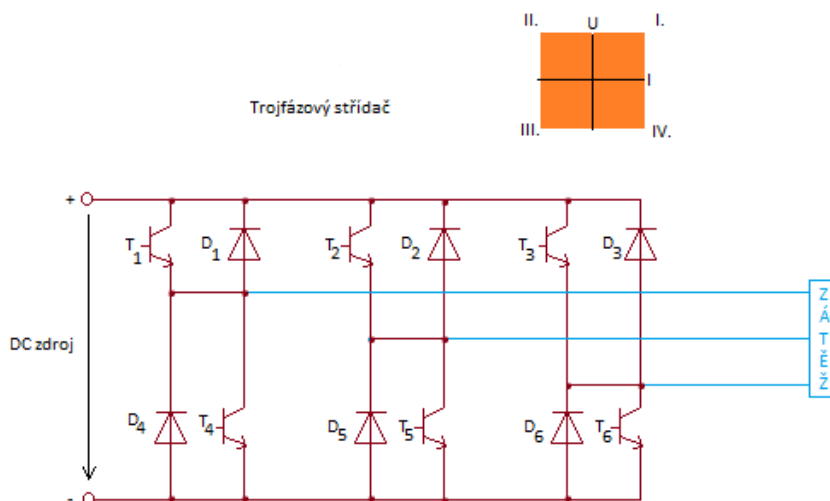
Jedná se o měnič, který je tvořen kombinací zvyšujícího a snižujícího měniče, jehož spínacími prvky nejčastěji bývají IGBT tranzistory. Jedná se tedy o měnič pracující ve všech čtyřech kvadrantech U-I roviny a topologicky se jedná o můstek typu Full Bridge viz. obrázek 9. Modulace je obdobná jako v kap. pulzního měniče nicméně zde je využíváno sinusové pulzní šířkové modulace. Spínání tranzistorů může být prováděno bipolárně či unipolárně. Bipolární řízení umožňuje spínání dvou tranzistorů v diagonále

a unipolární řízení je stejné ovšem s fázovým posuvem o polovinu periody. Hlavní výhoda aktivního usměrňovače spočívá v možnosti obousměrného toku energie a plynulý přechod mezi generátorickým a motorickým režimem, tedy mezi I., II., III. a IV. kvadrantem ω -M roviny. Vhodnou spínací kombinací tranzistorů lze přivádět proud do zátěže oběma směry a měnit také polaritu napětí na zátěži. Pokud je proud odebírán ze zdroje do zátěže, jedná se o motorický režim, je-li proud vrácen ze zátěže zpět do zdroje, jedná se o generátorický režim. Elektrický motor je typickou zátěží, u níž je možno měnit smysl momentu a úhlové rychlosti. Indukované napětí motoru je přímo úměrné úhlové rychlosti motoru a moment motoru je přímo úměrný proudu jdoucí motorem [16][19].

Aktivním usměrňovačem jsou dnes vybaveny veškeré moderní elektrické lokomotivy, které vynikají výhodou oproti starším generacím lokomotiv v charakteru odebíraného proudu. Odebíraný proud je téměř sinusového průběhu a je ve fázi s napětím trakčního vedení, čímž jsou významně redukovány vyšší harmonické složky [4].

3.4 Trojfázový střídač

Trojfázový střídač je řazen mezi DC-AC měniče neboli měniče, které přeměňují stejnosměrné napětí na trojfázové střídavé napětí. K tomuto účelu je využita šestice spínacích prvků, kterými v současnosti bývají IGBT tranzistory. Lze jej provozovat ve všech čtyřech kvadrantech U-I roviny, podobně jako můstek typu Full Bridge (viz. obrázek 10).



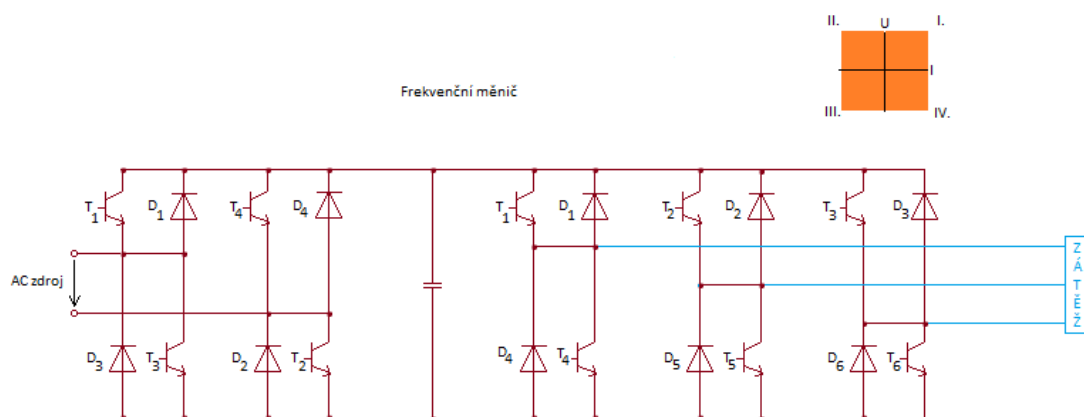
Obrázek 10 Schéma zapojení trojfázového střídače, překresleno z [16].

Řízení střídače je provedeno obdobně jako u aktivního usměrňovače pomocí sinusové pulzní šířkové modulace, kdy je porovnáván modulační signál sinusového průběhu o nízké frekvenci s vysokofrekvenčním signálem trojúhelníkového charakteru. Na výstupu střídače je modulováno střídavé napětí, kde zátěží bývá buď síť nebo třífázový pohon, např. asynchronní motor, který vlivem indukčnosti satorového vinutí

modulované napětí vyhlazuje. Trojfázové střídače mají schopnost rekuperace energie ze zátěže zpět do zdroje obdobně jako aktivní usměrňovač, a mohou tedy plynule přecházet mezi motorickým a generátorickým režimem [16].

3.5 Frekvenční měnič

Trojfázový střídač může tvořit společně s jednofázovým aktivním usměrňovačem jeden celek nazývaný jako frekvenční měnič, který je hojně využíván pro moderní elektrické lokomotivy s asynchronními motory. Jeho výhodami jsou 1) odběr téměř sinusového proudu z trakčního vedení je s vysokým účínkem první harmonické a 2) z hlediska kvality odběru jsou tedy tyto měniče lepší variantou oproti starším koncepcím elektrických lokomotiv, kde je výskyt vyšších harmonických daleko větší [4][5].



Obrázek 11 Schéma zapojení frekvenčního měniče, překresleno z [17].

4. KATEGORIZACE LOKOMOTIV PRO MODELOVÁNÍ

Pro simulaci zátěže trakční soustavy 25 kV/50 Hz jsou vybrány tři kategorie elektrických lokomotiv, které charakterem silových obvodů zastupují provozované lokomotivy v ČR na trakční soustavě 25 kV/50 Hz. V následujících kapitolách budou tyto tři kategorie popsány včetně parametrizace. Všechny lokomotivy jsou namodelovány v simulačním programu PSCAD.

4.1 Lokomotiva 1

Koncept lokomotivy 1 (Loko 1) je odvozen od starších generací lokomotiv provozovaných na trakční soustavě o napětí 25 kV/50 Hz, jejichž trakční výzbroj je sestavena z autotransformátoru, dvoucestného můstkového usměrňovače a stejnosměrných motorů se sériovým buzením.

Loko 1 reprezentuje konkrétní lokomotivy řady 230 a 242, které jsou typickými představiteli starších typů lokomotiv provozovaných na střídavé trakční soustavě 25 kV/50 Hz. Princip řízení a odebrání trakčního proudu je pro obě lokomotivy stejný. Odběr proudu z trakčního vedení je řízen pomocí autotransformátoru využívající přepínání odboček na primární straně trakčního transformátoru. Jelikož jsou obě lokomotivy vybaveny stejnosměrnými motory se sériovým buzením, součástí je i dvoucestný můstkový usměrňovač [23].

Tento koncept starších lokomotiv pro simulaci je vybrán z důvodu charakteru odebíraného proudu z trakčního vedení, jehož průběh je dán samotnou výzbrojí lokomotiv 230 a 242. V kombinaci použití dvoucestného můstkového usměrňovače a stejnosměrných motorů se sériovým buzením dochází k velmi silnému zkreslení odebíraného proudu. Průběh odebíraného proudu z trakčního vedení dosahuje téměř obdélníkový tvar, který obsahuje velké množství vyšších harmonických složek. Vlivem zvýšené efektivní hodnotě odebíraného proudu vyššími harmonickými dochází ke snížení celkového účinníku odběru [4].

4.2 Lokomotiva 2

Lokomotiva 2, dále ve zkratce Loko 2, představuje modernější koncept lokomotiv provozovaných na napájecí soustavě 25 kV/50 Hz. Tato trakční vozidla jsou charakterizována trakční výzbrojí, která obsahuje trakční transformátor, dvoucestný můstkový usměrňovač, pulzní měnič a stejnosměrné motory s cizím buzením.

Mezi typické představitele Loko 2 jsou zařazena hnací vozidla s označením 362, 363.5 a 365. Proud je odebírán z trakčního vedení do trakčního transformátoru, ze kterého je proud následně usměrněn pomocí dvoucestného můstkového usměrňovače. Po vyhlazení usměrněného napětí pomocí kondenzátoru je toto napětí přivedeno na kotevní pulzní měniče, které provádí řízení napětí na kotvě motorů. Spínání tyristorů pulzních

měníčů je provedeno pulzní šířkovou modulací se změnou spínací frekvence 33 1/3 Hz, 100 Hz a 300 Hz. Problematické je vypínání tyristoru, pokud je připojen na stejnosměrné napětí. Z toho důvodu je k tomuto tyristoru připojen zhášecí tyristor společně s LC obvodem, kde sepnutí zhášecího tyristoru způsobí pokles proudu hlavního tyristoru pod přídržnou hodnotu a dojde tak k vypnutí hlavního tyristoru [19] [20].

Pro simulaci je vybrán tento koncept z hlediska velké četnosti ještě dnes provozovaných lokomotiv řady 362, 363.5 a 365 a modernější trakční výzbroje, která už využívá pro řízení výkonu polovodičovou techniku. Nicméně je zde stále použit pro usměrnění odebíraného proudu dvoucestný můstkový usměrňovač, který má za následek obdobný charakter odebíraného proudu jako u lokomotiv 230 a 242. Je zde navíc zanesen vliv spínání pulzních měničů při odebírání proudu z trakčního vedení, a tak obdélníkový průběh je tímto spínáním ovlivněn [4].

4.3 Lokomotiva 3

Moderní technologii trakční výzbroje využívá lokomotiva 3, dále ve zkratce Loko 3, která zastupuje současná elektrická hnací vozidla hojně provozovaná na střídavé trakční soustavě 25 kV/50 Hz. Celý pohon Loko 3 je tvořen trakčním transformátorem, aktivním jednofázovým usměrňovačem, stejnosměrným meziobvodem, trojfázovým střídačem a asynchronními motory.

Loko 3 představuje zástupce provozovaných hnacích vozidel řady 380, Vectron, 640 a 650. Tato trakční vozidla vynikají velice podobnou trakční výzbrojí a z hlediska topologie silového trakčního obvodu jsou tato vozidla téměř stejná. Trakční odběr je přiveden přes transformátor hnacího vozidla na vstup aktivního jednofázového usměrňovače, který vhodným spínáním IGBT tranzistorů udržuje žádanou hodnotu napětí stejnosměrného meziobvodu. Toto stejnosměrné napětí je dále přivedeno na trojfázový střídač, který řídí napětí na vstupu asynchronních motorů. Vzhledem k existenci čtyřkvadrantového měniče jsou tato hnací vozidla uzpůsobena k rekuperaci elektrické energie z asynchronních motorů zpět do sítě při elektrodynamickém brzdění [24].

Výhoda těchto lokomotiv spočívá ve využití jednofázového aktivního usměrňovače, který zajišťuje sinusový odběr proudu z trakčního vedení, a tak trakční soustava není zatížena přítomností vyšších harmonických složek odebíraného proudu [4].

5. PARAMETRIZACE LOKOMOTIV, TVORBA MODELŮ LOKOMOTIV, VÝSTUPNÍ HODNOTY SIMULACE

Pro parametrizaci Loko 1, Loko 2 a Loko 3 jsou použity konstrukční parametry hnacích vozidel řady 242, 230, 362, 365, 363.5, Vectron, 380 a elektrických jednotek řady 640, 650 a ICE 7. Z hlediska mechanického chování vlaku je zapotřebí zjistit maximální výkon, maximální tažnou sílu, hmotnost, maximální rychlost, průměr kola a koeficient k_b , který znázorňuje strmost nárůstu momentu pro překonání jízdních odporů vlaku. Parametry jsou shrnuty v tab. 1.

Tabulka 1 Parametrizace hnacích vozidel, zjištěno z [25][26].

	Lokomotiva							El. jednotka		
Parametry	242	230	362	365	363.5	Vectron	380	640	650	ICE 7
Model	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
Max. výkon (kW)	3080	3080	3060	2910	3700	6400	6400	2040	1360	8000
Max. tažná síla (kN)	240	320	260	225	300	300	274	200	200	300
Hmotnost (t)	84	85	87	85	88	85	86	360	180	454
Max. rychlost (km/h)	120	110	140	120	120	160	160	160	160	160
Průměr kola (mm)	1215	1215	1215	1215	1215	1210	1210	1210	1210	1210
k_b (-)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Jako průměr kola je uvažován aritmetický průměr mezi rozměry nového kola a opotřebovaného kola. Pro Loko 1 a Loko 2 hodnota průměru nového kola odpovídá 1250 mm a opotřebovaného 1180 mm. Pro Loko 3 je hodnota průměru nového kola stejná jako pro Loko 1 a Loko 2 a průměr opotřebovaného kola činí 1170 mm.

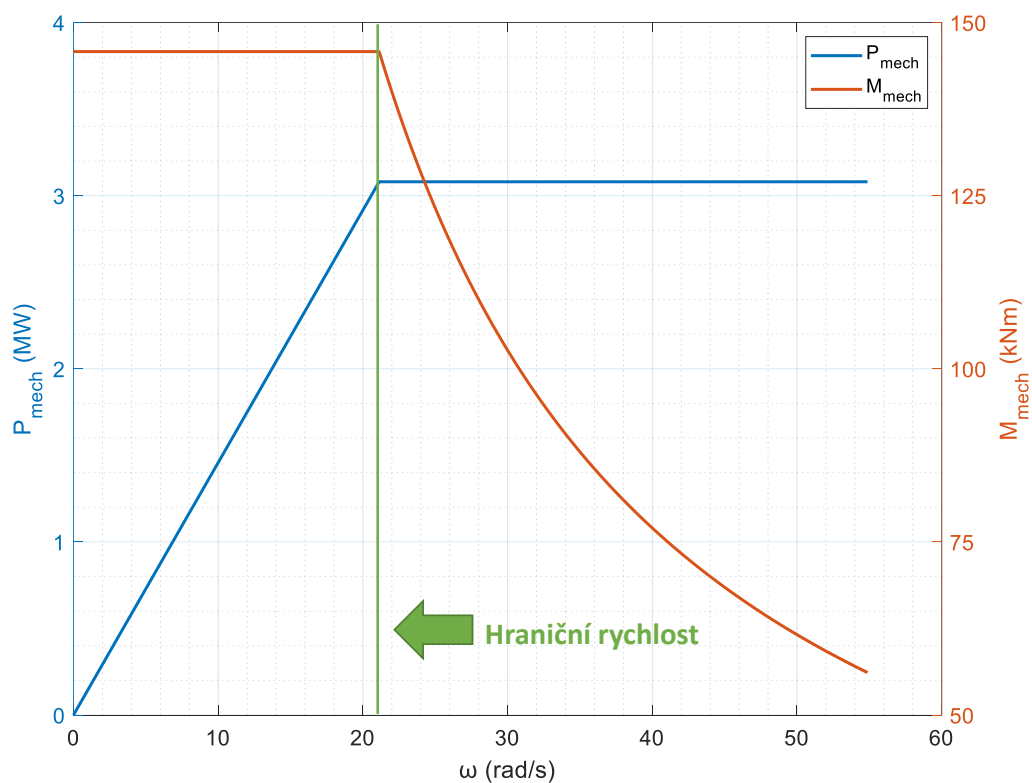
Tabulka 2 Parametrizace osobních a nákladních vozů.

Parametry	Osobní vůz	Nákladní vůz
Hmotnost vozu (t)	50	90
Počet vozů (-)	0÷9	0÷9

Pro hmotnost osobních a nákladních vozů je vybrána průměrná hodnota, která odpovídá provozovaným vozům.

Z hlediska mechanického momentu a výkonu jsou všechna trakční vozidla charakterizována trakční charakteristikou, což je závislost tažné síly lokomotivy na rychlosti vlaku. Tyto charakteristiky jsou převedeny na momentové charakteristiky.

Názorný příklad momentové charakteristiky a závislosti mechanického výkonu na úhlové rychlosti nápravy lokomotivy řady 242 je zobrazen na obrázku 12.



Obrázek 12 Momentová charakteristika včetně závislosti mechanického výkonu na úhlové rychlosti nápravy lokomotivy řady 242.

Tato charakteristika je rozdělena na dvě oblasti, které jsou nazvány oblast konstantního momentu a oblast konstantního výkonu. Obě oblasti jsou děleny určitou mezní rychlostí hnacího vozidla, které je vozidlo schopno dosáhnout při zvyšování napětí na motorech. Při rozjezdu lokomotivy je tedy z nulové rychlosti až po hraniční rychlost vozidla zajištěn konstantní průběh tažné síly, a tedy i mechanického momentu na hřídeli trakčních motorů. Jestliže je tedy v této oblasti konstantní průběh mechanického momentu na hřídeli motorů, s rostoucí rychlostí vozidla roste mechanický výkon na hřídeli trakčních motorů lineárně, až do bodu hraniční rychlosti. Z této úvahy plyne, že momentová charakteristika (viz. obrázek 12) je dána vzájemným vztahem mezi mechanickým momentem, výkonem a úhlovou rychlostí nápravy

$$M_{\text{mech}} = F \cdot r_{\text{kola}}$$

$$P_{\text{mech}} = M_{\text{mech}} \cdot \omega \quad (16)$$

$$\omega = \frac{v}{r_{\text{kola}}},$$

kde M_{mech} je mechanický moment hnacího vozidla, F je tažná síla hnacího vozidla, r_{kola} je poloměr kola hnacího vozidla, P_{mech} je mechanický výkon hnacího vozidla, ω je úhlová rychlost nápravy hnacího vozidla a v je rychlost hnacího vozidla. Při dosažení mezní rychlosti vozidla se trakční motory začnou odbuzovat, přičemž mechanický výkon je konstantní. Pakliže je mechanický výkon konstantní s dále rostoucí rychlostí hnacího vozidla, mechanický moment na hřídeli trakčních motorů nepřímo úměrně klesá [27].

Pro simulaci takové charakteristiky je nejprve vypočtena hraniční úhlová rychlost nápravy pomocí maximálního mechanického výkonu hnacího vozidla a maximálního mechanického momentu, který je lokomotiva schopna vyvinout

$$\omega_{hr} = \frac{P_{max}}{M_{max}} = \frac{P_{max}}{F_{max} \cdot r_{kola}} = \frac{P_{max}}{F_{max} \cdot (d_{kola} \cdot \frac{10^{-3}}{2})}, \quad (17)$$

kde P_{max} je maximální mechanický výkon hnacího vozidla, který odpovídá tabelované hodnotě maximálního výkonu vozidla z tab. 1, M_{max} je maximální mechanický moment hnacího vozidla, F_{max} je maximální tažná síla hnacího vozidla, která odpovídá tabelované hodnotě maximální síly vozidla z tab. 1, r_{kola} je poloměr kola hnacího vozidla a d_{kola} je průměr kola hnacího vozidla, který odpovídá tabelované hodnotě průměru kola vozidla viz. tab. 1. Pro obecnou momentovou rovnici vlaku je použit tvar

$$M_{mech} = M_A(s) + M_B(\omega) + J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_A(s) + k_B \cdot \omega + J \cdot a_{max}, \quad (18)$$

kde $M_A(s)$ představuje moment, který je závislý na sklonu tratě, k_B je koeficient uvedený v tabulce viz. tab. 1 a znázorňuje moment pro překonání jízdních odporů vlaku, ω je úhlová rychlost nápravy, člen $J \cdot d\omega/dt$ představuje akcelerační moment, kde J označuje celkový moment setrvačnosti vlaku a a_{max} je maximální úhlové zrychlení. Rovnice pro mechanický výkon hnacího vozidla je použita ve tvaru

$$P_{mech} = M_{mech} \cdot \omega = M_A(s) \cdot \omega + k_B \cdot \omega^2 + J \cdot a_{max} \cdot \omega, \quad (19)$$

kde M_{mech} je mechanický moment hnacího vozidla. Z obecného tvaru momentové rovnice (viz rov. (18)) je za pomoci rovnice pro mechanický výkon hnacího vozidla (viz rov. (19)) vytvořena oblast konstantního momentu a konstantního výkonu. Rozdělením těchto dvou oblastí je zjištěno maximální úhlové zrychlení, které je schopno hnací vozidlo v oblasti konstantního momentu nebo konstantního výkonu vyvinout

$$a_{max}(\omega) = \mp \frac{P_{mech} - M_A(s) \cdot \omega - k_B \cdot \omega^2}{\omega \cdot J}. \quad (20)$$

Pro oblast konstantního momentu je maximální úhlové zrychlení dáno rovnicí:

$$a_{max}(\omega) = \mp \frac{M_{max} \cdot \omega - M_A(s) \cdot \omega - k_B \cdot \omega^2}{\omega \cdot J} = \frac{M_{max} - M_A(s) - k_B \cdot \omega}{J}, \quad (21)$$

kde M_{max} je maximální mechanický moment hnacího vozidla. Tento moment je dán velikostí maximální tažné síly hnacího vozidla, která je uvedena v tab. 1. Pro případ

brzdění vlaku je vypočteno maximální úhlové zrychlení s opačným znaménkem. V oblasti konstantního výkonu je maximální úhlové zrychlení vyjádřeno:

$$a_{max}(\omega) = \frac{P_{max} - M_A(s) \cdot \omega - k_B \cdot \omega^2}{\omega \cdot J}, \quad (22)$$

kde P_{max} uvádí maximální mechanický výkon hnacího vozidla, který odpovídá tabelované hodnotě maximálního výkonu vozidla z tab. 1. Pro výpočet maximálního úhlového zrychlení v oblasti konstantního momentu a konstantního výkonu je zjištěna úhlová rychlost nápravy

$$\omega = \frac{v}{r_{kola}} = \frac{1}{r_{kola}} \cdot \int a_z dt = \frac{1}{r_{kola}} \cdot \int a_{max}(\omega) \cdot k_z dt, \quad (23)$$

kde v je rychlost vlaku, r_{kola} je poloměr kola hnacího vozidla, a_z znázorňuje žádané úhlové zrychlení a k_z představuje koeficient vyjadřující poměr a_z/a_{max} v poměrných jednotkách. Dalším parametrem potřebným ke zjištění maximálního úhlového zrychlení pro oblasti konstantního momentu a konstantního výkonu je moment setrvačnosti vlaku

$$J = (m_{lok} + m_{vozu} \cdot n_{vozu}) \cdot r_{kola}^2, \quad (24)$$

kde m_{lok} je hmotnost lokomotivy či elektrické jednotky viz. tab. 1, m_{vozu} je hmotnost osobního nebo nákladního vozu a n_{vozu} je počet osobních nebo nákladních vozů viz. tab. 2

Parametrizace osobních a nákladních vozů. 2. K simulaci jízdy vlaku je využita lokomotiva s určitým počtem osobních nebo nákladních vozů, zařazených do soupravy. Kromě klasické soupravy jsou také parametrizovány elektrické jednotky, nahrazující klasickou soupravu lokomotivy s vozy. Pro simulaci takové jednotky je uvažována hmotnost celé soupravy jako hmotnost m_{lok} pro elektrické jednotky z tab. 1, kterou je nahrazena celá závorka v rovnici (24). Pro výpočet výsledného mechanického momentu a výkonu generovaného na hřídeli trakčních motorů je do posledního članku výpočtu zařazen výpočet momentu v závislosti na sklonu tratě

$$M_A(s) = (m_{lok} + m_{vozu}) \cdot g \cdot \frac{s}{1000} \cdot r_{kola}, \quad (25)$$

kde g vyjadřuje tíhové zrychlení $9,81 \text{ ms}^{-2}$ a s je sklon tratě v jednotkách ‰.

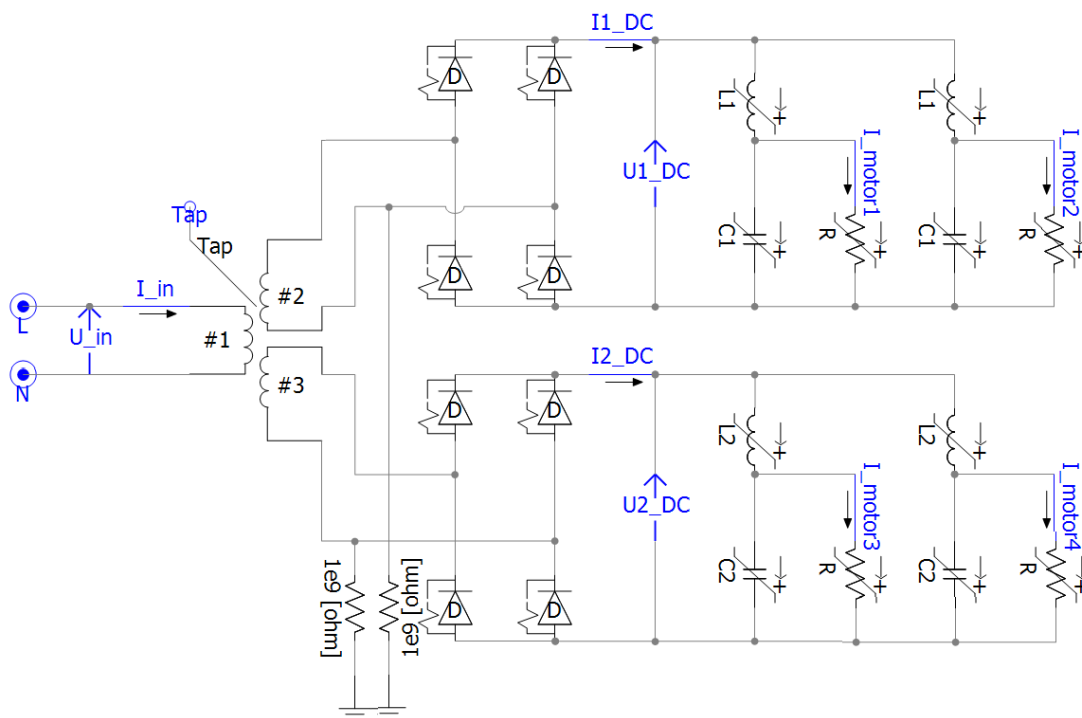
5.1 Modelování a simulace lokomotiv

Modely Loko 1, Loko 2 a Loko 3 jsou realizovány sestavením zjednodušených schémat silových trakčních obvodů, která vychází z konstrukce provozovaných lokomotiv a elektrických jednotek, zmíněných v tab. 1. Každé schéma obsahuje zdroj střídavého napětí reprezentující trakční napájecí soustavu s efektivní hodnotou napětí 25 kV a frekvencí sítě 50 Hz, vypínač, konkrétní řízení výkonu k dané lokomotivě a zjednodušený model motoru. Schémata jsou zjednodušená do míry postačující k docílení typického charakteru odběru.

Výstupem momentové rovnice pro oblasti konstantního momentu a výkonu je mechanický výkon. Pro zjednodušení je využit princip zachování energie/výkonu a hodnota mechanického výkonu je zároveň považována za elektrický výkon na rezistoru, představující trakční motor. Implementace mechanického výkonu je u každé lokomotivy docílena jiným způsobem, detailně popsáno v dalších sekcích. Při procesu brzdění nastane změna znaménka mechanického momentu, přičemž směr otáčení dvojkolí je stále stejný. Mechanický výkon je tak záporný, požadované úhlové zrychlení je opačné a vlak zpomaluje. Výstupní hodnotou simulací je vždy průběh odebíraného proudu z trakčního vedení, který je dále posuzován z hlediska kvality odběru, a to z pohledu celkového účinníku odběru a harmonického zkreslení.

5.1.1 Lokomotiva 1

Pro konstrukci schématu trakčního silového obvodu Loko 1 je využito znalosti z teorie o konstrukci elektrické výzbroje lokomotiv řady 242 a 230. Ve zjednodušené podobě je realizováno schéma lokomotivy pomocí trakčního transformátoru se dvěma sekundárními vinutími a s možností volby počtu odboček na primární straně trakčního transformátoru, dvoucestného můstkového usměrňovače s LC filtrem a modelu odběru stejnosměrného motoru pomocí R zátěže.



Obrázek 13 Zjednodušené schéma trakčního silového obvodu Loko 1.

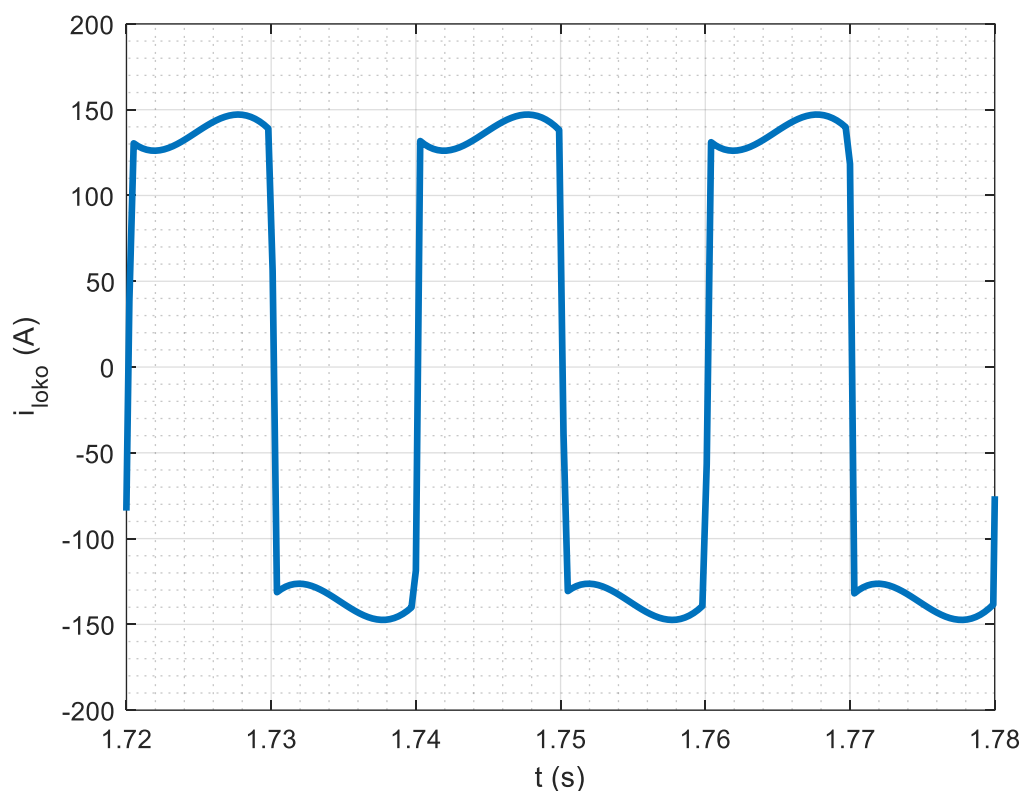
Řízení výkonu Loko 1 je vytvořeno pomocí přepínání odboček na primární straně trakčního transformátoru, což je v PSCADu realizováno změnou poměru odboček transformátoru. Parametry transformátoru jsou zvoleny tak, aby při plném počtu

sepnutých odboček bylo transformováno napětí z hladiny 25 kV na 965 V. Celkový počet odboček trakčního transformátoru je zvolen na 32 podle reálného zapojení lokomotivy řady 242 a 230. Pro každou odbočku je zvolena konkrétní hodnota poměru odboček transformátoru tak, aby zvyšováním počtu odboček na transformátoru byl zajištěn vzrůst napětí na sekundárních vinutích o 30,156 V. V této fázi je ovládání odboček realizováno manuálně a na obrázku 12 je nasimulován lineární nárůst mechanického výkonu až do hodnoty hraničních otáček dvojkolí, kde je způsoben zlom průběhu mechanického výkonu na konstantní hodnotu. Hodnota odporu R je vypočítána z nominálního výkonu lokomotivy P_n a nominálního napětí sekundárního vinutí U_{ns}

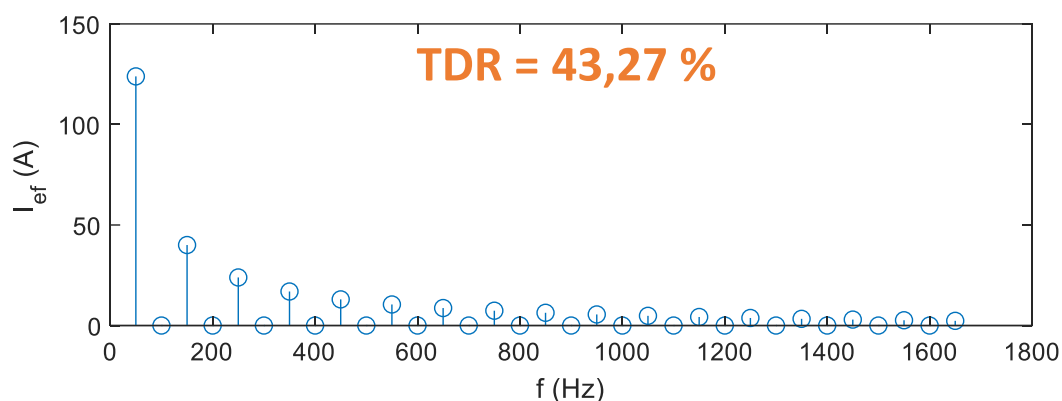
$$R = \frac{U_{ns}^2}{P_n} . \quad (26)$$

Pro usměrnění transformovaného napětí je zhotoven dvoucestný usměrňovač v můstkovém zapojení s využitím čtyř diod. Na výstup usměrňovače je zapojen LC filtr pro vyhlazení usměrněného napětí a pro dominanci velké indukčnosti trakčního obvodu. Na obrázku 14 lze vidět obdélníkový průběh odebíraného proudu. Takový průběh odebíraného proudu je predikován vzhledem k dispozici dvoucestného můstkového usměrňovače, indukčnosti tvořené RL zátěží a vinutím trakčního transformátoru, a indukčnosti trakčního obvodu. Z detailního přiblížení průběhu je patrné, že charakter proudu je obdélníkový a trakční soustava je zatěžována vyššími harmonickými složkami odebíraného proudu. Obrázek 15 znázorňuje harmonické spektrum, typické pro obdélníkový průběh, kde hodnota činitele zkreslení TDR činí 43,27 %.

Vyšší harmonické, obsažené v odebíraném proudu, jsou filtrovány v trakčních transformovnách pomocí filtračně-kompenzačních zařízení. Kromě zkreslení proudu usměrňovačem dochází k fázovému posuvu mezi napětím a proudem na první harmonické. Indukční jalový výkon způsobuje zhoršení účinnosti takových lokomotiv na hodnotu v rozmezí 0,8 až 0,7, což je pro DS nepřijatelné. Tento jalový výkon je poté kompenzován v trakčních transformovnách pomocí kompenzačních zařízení [3][16][18].



Obrázek 14 Detail průběhu odebíraného proudu Loko 1 při využití plného počtu odboček.

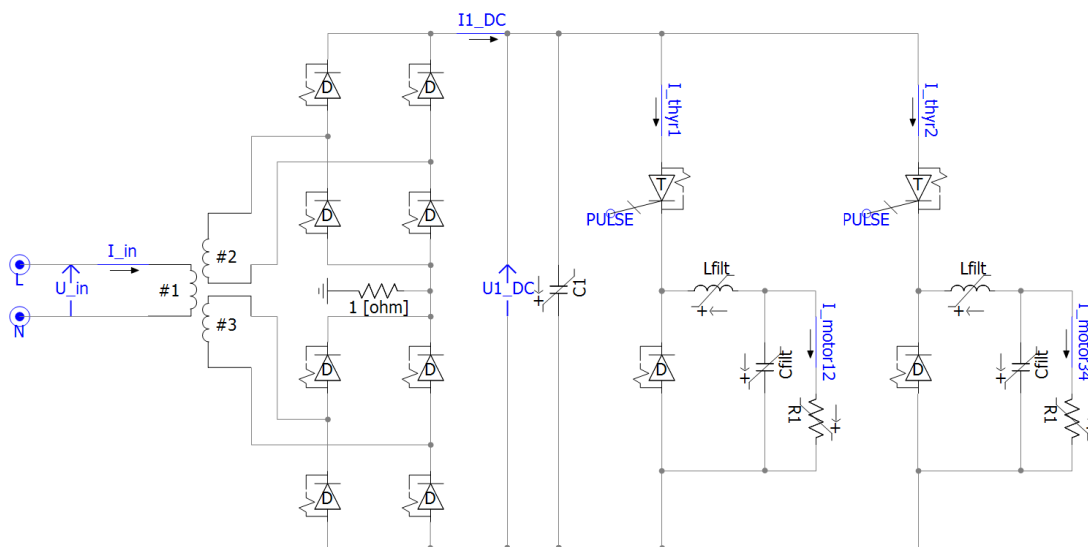


Obrázek 15 Harmonické spektrum průběhu odebíraného proudu.

5.1.2 Lokomotiva 2

Při návrhu schématu Loko 2 je postupováno dle reálného zapojení trakčního silového obvodu, přičemž je opět zjednodušen tak, aby bylo podchyceno základní chování lokomotivy. Pro konstrukci schématu silového obvodu je uvažován koncept pro lokomotivy řady 362, 365 a 363.5 počínaje trakčním transformátorem se dvěma sekundárními vinutími a převodu 25/1,667 kV pro každé sekundární vinutí, dvoucestného

můstkového usměrňovače, tyristorového pulzního měniče s LC filtrem a zjednodušeného modelu stejnosměrného motoru pomocí R zátěže (obr. 16).

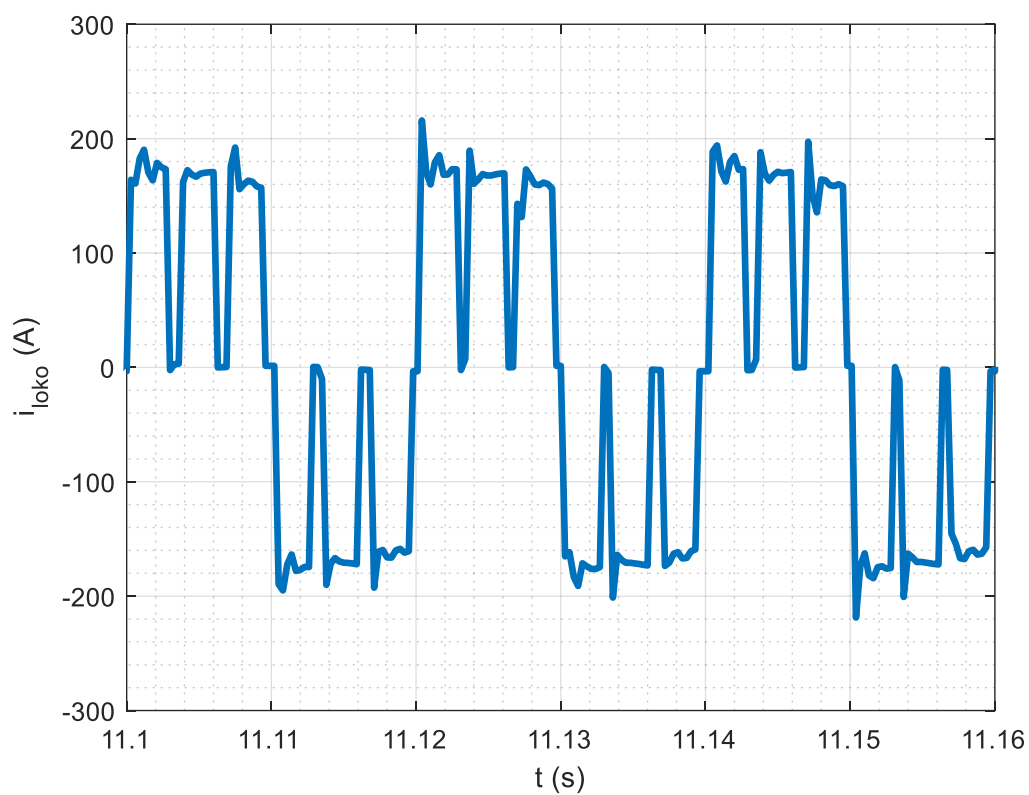


Obrázek 16 Zjednodušené schéma trakčního silového obvodu Loko 2.

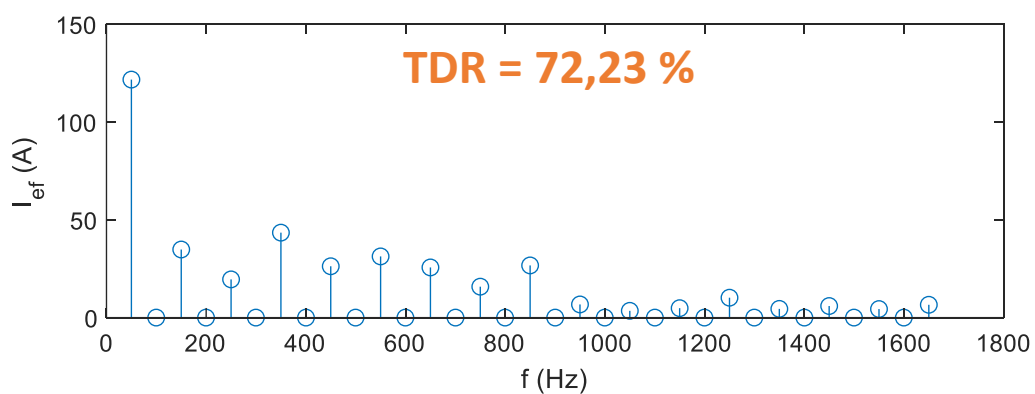
Samotné řízení výkonu lokomotivy je realizováno pomocí tyristorového pulzního měniče s využitím GTO tyristoru, který je zvolen pro jednoduchý princip spínání a jehož volbou zároveň není ovlivněno typické chování lokomotivy z hlediska průběhu vstupního proudu lokomotivy. Pro řízení těchto tyristorů je vytvořen signál pulzní šířkové modulace pomocí komparátoru pro porovnávání střidy spínaného tyristoru a pilovitého signálu s třemi úrovněmi kmitočtu. Úrovně kmitočtu jsou $33 \frac{1}{3}$ Hz, 100 Hz a 300 Hz, kde změna úrovně kmitočtu je spjata s úrovní střidy spínaného tyristoru, což je v souladu s řízením lokomotivy. Kmitočet pilovitého signálu $33 \frac{1}{3}$ Hz je přiřazen k hodnotě střidy spínaného tyristoru v rozmezí $0,011 \div 0,034$; kmitočet 100 Hz je udržován při úrovni střidy v rozmezí $0,034 \div 0,103$; frekvence 300 Hz je zvolena při hodnotě střidy spínaného tyristoru v rozsahu $0,103 \div 0,899$ a změna frekvence z hodnoty 300 Hz na 100 Hz je nastavena při úrovni střidy 0,9. Hodnota odporu R zátěže je pro Loko 2 vypočtena stejným způsobem jako pro Loko 1 (viz. rov. (26)).

Pomocí dvoucestného můstkového usměrňovače je usměrněn proud sekundárního vinutí trakčního transformátoru, kde na výstup usměrňovače je umístěn kondenzátor pro vyhlazení usměrněného napětí sekundárního vinutí transformátoru. Na obrázku 17 je zachycen průběh odebíraného proudu, který má obdélníkový charakter podobně jako Loko 1. Je to způsobeno existencí dvoucestného můstkového usměrňovače, indukčností LC filtru charakterizující velkou indukčnost trakčního obvodu. Oproti průběhu odebíraného proudu Loko 1 (obr. 14) je zde proud navíc modulován spínáním tyristoru pulzního měniče. Průběh odebíraného proudu, tak jako u Loko 1, je důležitým parametrem pro posouzení kvality odběru z trakčního vedení při provozu Loko 2.

Obrázek 18 znázorňuje harmonické spektrum tohoto průběhu, kde činitel zkreslení TDR je roven 72,23 %.



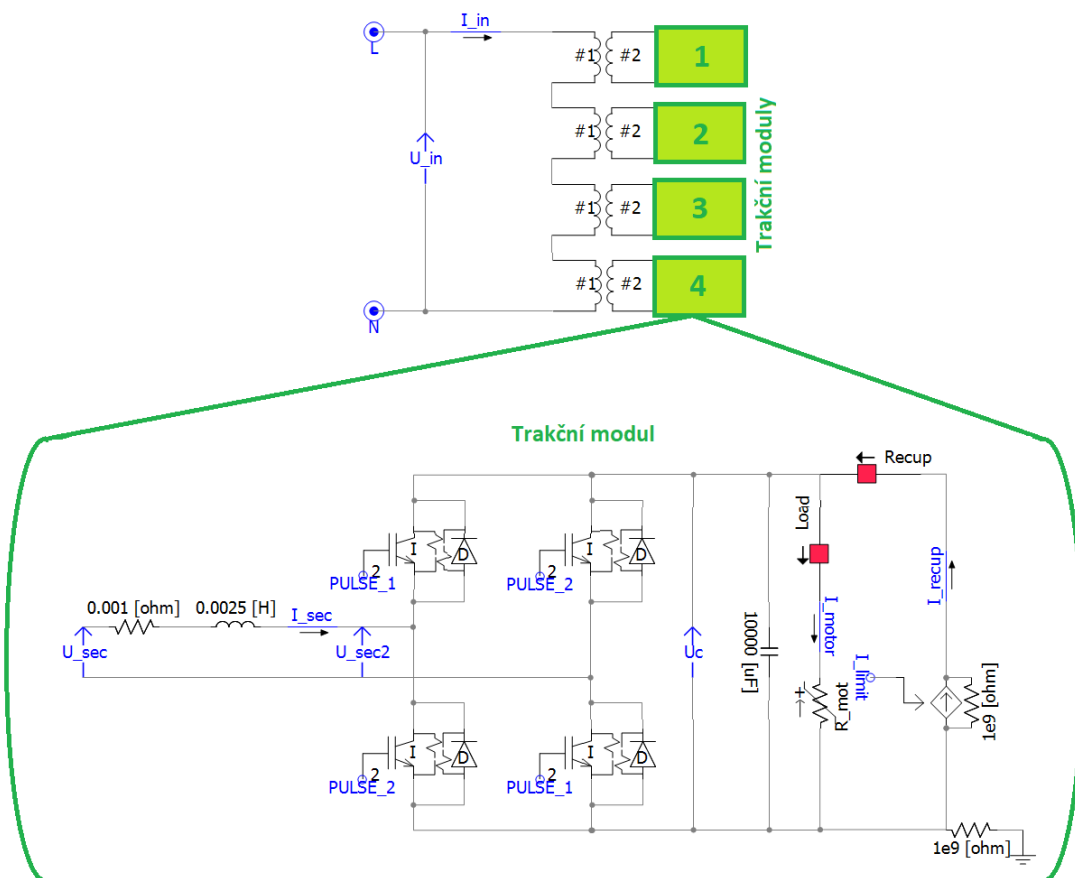
Obrázek 17 Detail průběhu odebíraného proudu Loko 2 při spínací frekvenci 300 Hz.



Obrázek 18 Harmonické spektrum průběhu odebíraného proudu.

5.1.3 Lokomotiva 3

Model Loko 3 se skládá ze základních komponent trakčního silového obvodu moderních elektrických lokomotiv a jednotek, představující hnací vozidla řady 380, Vectron, 640, 650 a ICE 7. Celková koncepce trakční výzbroje je vytvořena pomocí trakčního transformátoru se čtyřmi sekundárními vinutími, aktivního jednofázového usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a R zátěže, charakterizující asynchronní motor s možností rekuperace v podobě proudového zdroje.



Obrázek 19 Zjednodušené schéma trakčního silového obvodu Loko 3.

Spínání IGBT tranzistorů aktivního jednofázového usměrňovače je řízeno příslušnými regulačními smyčkami. Celé řízení aktivního jednofázového usměrňovače je konstruováno dle literatury [9] jako soubor regulačních smyček pro stabilizaci hodnoty napětí stejnosměrného meziobvodu a proudovou regulační smyčkou odebíraného proudu ze sekundárního vinutí transformátoru. Napěťová smyčka pro regulaci stejnosměrného meziobvodu se skládá z PI regulátoru, přenosové funkce uzavřené proudovou smyčkou a z modelu stejnosměrného meziobvodu pro exaktní zjištění odchylky mezi žádanou hodnotou napětí a naměřenou.

Regulační smyčka napětí stejnosměrného meziobvodu



Obrázek 20 Regulační smyčka napětí stejnosměrného meziobvodu, překresleno z [9].

PI regulátor je naznačen na obrázku 20 blokem $G_{PI}^v(s)$, který je dán rovnicí

$$G_{PI}^v(s) = k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s}, \quad (27)$$

kde k_{pv} je proporcionální člen a k_{iv} je integrační člen regulátoru

$$k_{pv} = \frac{C_{dc}}{2 \cdot \sqrt{T_s \cdot T_{iv}}} \quad (28)$$

$$k_{iv} = \frac{C_{dc}}{2 \cdot \sqrt{T_s \cdot T_{iv}^3}},$$

kde C_{dc} je kapacita kondenzátoru meziobvodu, T_s je perioda odpovídající spínací frekvenci, T_{iv} je integrační časová konstanta, jejíž hodnota je kvalifikovaně odhadnuta, v_{dc}^* je žádaná hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu a v_{dc} je skutečná hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu. Dalším blokem je přenosová funkce s uzavřenou proudovou smyčkou $G_{cl}^d(s)$ vyjádřena rovnicí

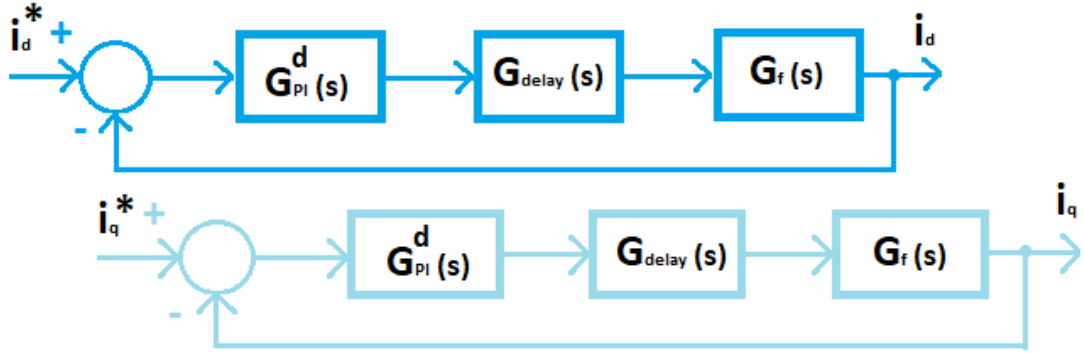
$$G_{cl}^d(s) = \frac{1}{1 + 3 \cdot T_s s}, \quad (29)$$

kde T_s je perioda odpovídající spínací frekvenci. Posledním článkem v regulační smyčce představuje napěťový model stejnosměrného meziobvodu $G_v(s)$, který je dán vztahem

$$G_v(s) = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_m}{V_{dc} \cdot C_{dc} s}, \quad (30)$$

kde V_m je amplituda napětí sekundárního vinutí transformátoru, V_{dc} je napětí meziobvodu a C_{dc} je kapacita kondenzátoru meziobvodu. V regulační smyčce proudu sekundárního vinutí transformátoru je uvažována přenosová funkce PI regulátoru, přenosová funkce zpoždění šířkově pulzní modulace a přenosová funkce filtru na vstupu měniče.

Regulační smyčka proudu sekundárního vinutí transformátoru



Obrázek 21 Regulační smyčka proudu sekundárního vinutí transformátoru, překresleno z [9].

PI regulátor je tvořen blokem $G_{PI}^d(s)$ a vyjádřen jako

$$G_{PI}^d(s) = k_{pd} + \frac{k_{id}}{s}, \quad (31)$$

kde k_{pd} je proporcionální člen a k_{id} je integrační člen regulátoru

$$k_{pd} = \frac{L_f}{3 \cdot T_s} \quad (32)$$

$$k_{id} = \frac{L_f}{3 \cdot T_s \cdot T_f},$$

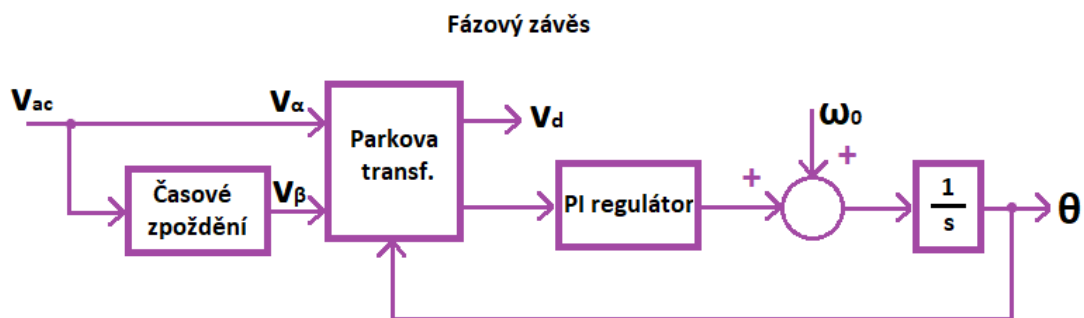
kde L_f je indukčnost vstupního filtru, T_s je perioda odpovídající spínací frekvenci a T_f je časová konstanta filtru L_f/R_f , i_d^* je žádaná hodnota proudu d-složky z Parkovy transformace, i_d je skutečná hodnota proudu d-složky z Parkovy transformace, i_q^* je žádaná hodnota proudu q-složky z Parkovy transformace a i_q je skutečná hodnota proudu q-složky z Parkovy transformace. Zpoždění šířkově pulzní modulace je dáno přenosovou funkcí

$$G_{delay}(s) = \frac{1}{1 + 1,5 \cdot T_s s}, \quad (33)$$

kde T_s je perioda odpovídající spínací frekvenci. Posledním členem v řetězci regulační smyčky je přenosová funkce filtru na vstupu měniče, vyjádřena

$$G_f(s) = \frac{1}{R_f + L_f s}, \quad (34)$$

kde R_f je odpor a L_f je indukčnost vstupního filtru. Pro synchronizaci fáze napětí sekundárního vinutí transformátoru a fáze napětí vytvořeného Parkovou transformací do dq složek je sestaven fázový závěs PLL.



Obrázek 22 Fázový závěs, překresleno z [9].

PI regulátor je zde dán rovnicí

$$G_{PI}(s) = k_1 + \frac{k_2}{s}, \quad (35)$$

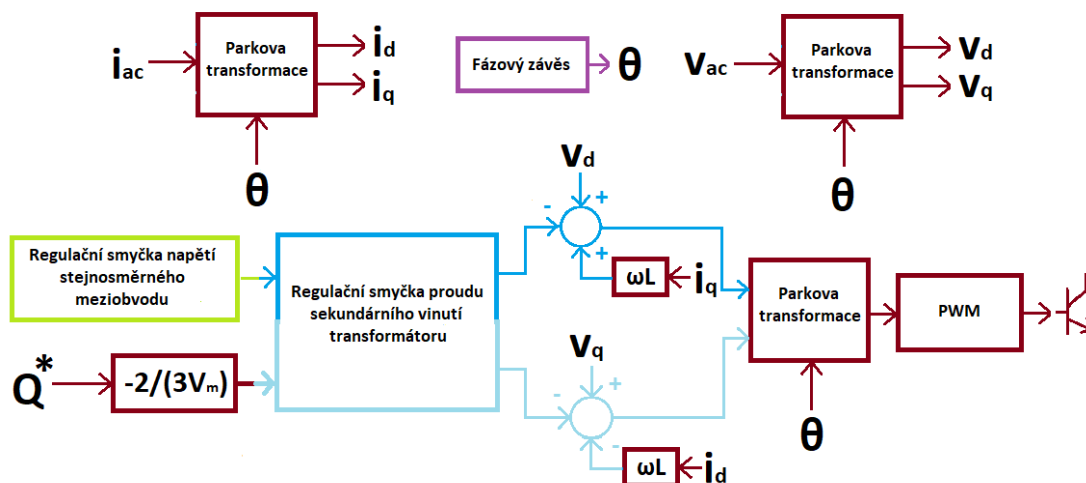
kde k_1 je proporcionální člen a k_2 je integrační člen regulátoru

$$k_1 = \frac{9,2}{t_s} \quad (36)$$

$$k_2 = \frac{42,3}{t_s^2},$$

kde t_s je doba ustálení fázového závěsu, která je kvalifikovaně odhadnuta, v_{ac} je napětí sekundárního vinutí transformátoru, v_α a v_β je napětí α -složky a β -složky z transformace Clarkové, v_d je hodnota napětí d-složky z Parkovy transformace, ω_0 je úhlový kmitočet sítě a θ je synchronizovaná fáze napětí sítě a fáze napětí vytvořeného Parkovou transformací. Kompletní řídicí struktura aktivního jednofázového usměrňovače je zobrazena na obrázku 23.

Řídicí struktura aktivního jednofázového usměrňovače



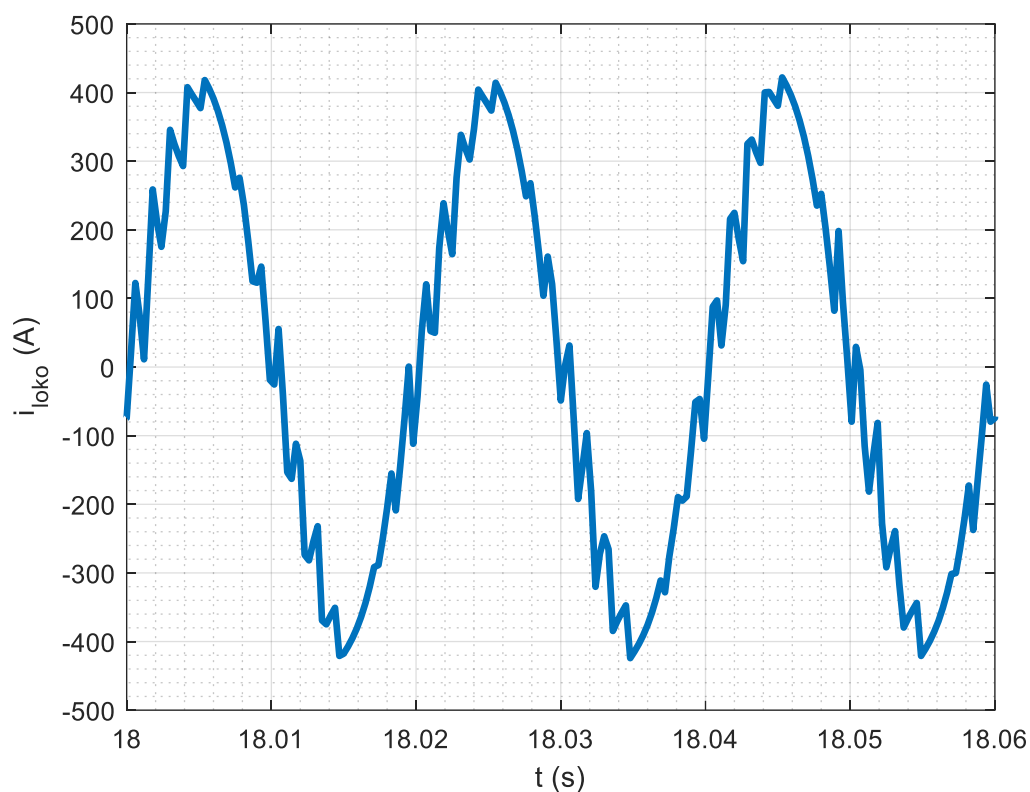
Obrázek 23 Řídicí struktura jednofázového aktivního usměrňovače u Loko 3, Q^* je žádaný jalový výkon sekundárního vinutí transformátoru, ωL je reaktance vstupního filtru, překresleno z [9].

Ovládací veličinou výkonu modelu Loko 3 je přímo koeficient poměru žádaného zrychlení k_z , které vstupuje do pohybové rovnice. Mění se tak mechanický výkon lokomotivy, který se v tomto případě nastavuje přímo prostřednictvím elektrického výkonu na rezistoru R

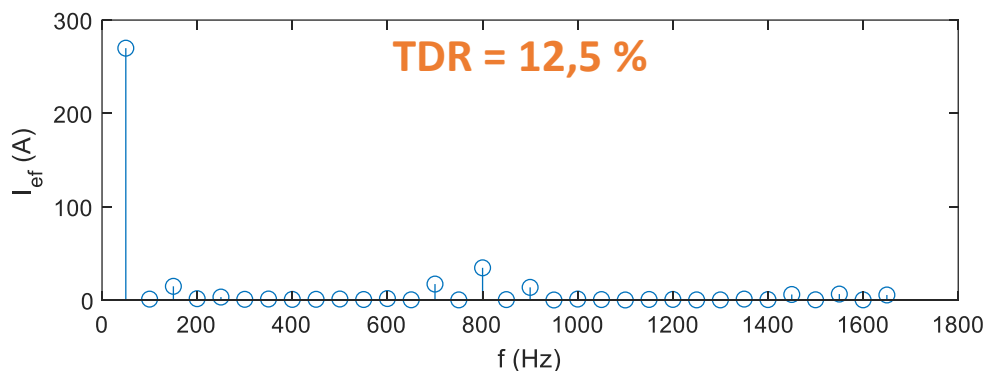
$$R = \frac{U_{cnom}^2}{P_{mech}}, \quad (37)$$

kde U_{cnom} je nominální napětí stejnosměrného meziobvodu a P_{mech} je mechanický výkon lokomotivy.

Změnou velikosti výkonu zátěže v meziobvodu dojde ke změně napětí ve stejnosměrném meziobvodu, které doreguluje aktivní usměrňovač automaticky na žádanou hodnotu odběrem/dodávkou z/do trakčního vedení. Na obrázku 24 je ukázán průběh odebíraného proudu z trakčního vedení. Je zřejmé, že kvalita odběru je zde zcela odlišná od průběhů odebíraného proudu Loko 1 a Loko 2. Sinusový průběh se superponovaným zvlněním způsobeným pulzně šířkovou modulací, tlumeným vstupním filtrem, je přijatelnější variantou charakteru odběru oproti obdélníkovým průběhům, což je znázorněno i v harmonickém spektru (obrázek 25), kde je podíl vyšších harmonických nižší. Hodnota činitele zkreslení TDR je 12,5 %.



Obrázek 24 Detail průběhu odebíraného proudu Loko 3 při spínací frekvenci 800 Hz.



Obrázek 25 Harmonické spektrum průběhu odebíraného proudu.

V rámci Loko 3 je do modelů zakomponováno limitní proudové omezení při rekuperačním brzdění vlaku. Dle [28] je pro trakční napájecí soustavu 25 kV/50 Hz zavedeno proudové omezení, jehož limit je stanoven na hodnotu 250 A na jednu soupravu, tj. maximální proudová hodnota v součtu za všechna hnací vozidla řazená ve vlaku. Pro tuto hodnotu dodávaného proudu do trakčního vedení odpovídá marginální elektrický výkon 6,25 MW na soupravu, kde pro jednotlivé lokomotivy je vypočten omezovací proud proudového zdroje tak, aby nebyla překročena hodnota 250 A při

dodávce do trakčního vedení. Z hlediska nominálního výkonu lokomotiv dle reálných parametrů má proudové omezení praktický význam u lokomotiv řady 380, Vectron a ICE 7, které disponují nominálním mechanickým výkonem větším než 6,25 MW. Pro elektrické jednotky řady 640 a 650 s nižším nominálním výkonem je vypočtena pouze dodávka proudu z proudového zdroje, která odpovídá aktuálnímu mechanickému výkonu při brzdění soupravy. Pro získání marginálního výkonu a proudového omezení při rekuperaci je využita rovnice

$$P_{mar} = U_n \cdot I_{mar} \cdot \cos(\varphi_1)$$

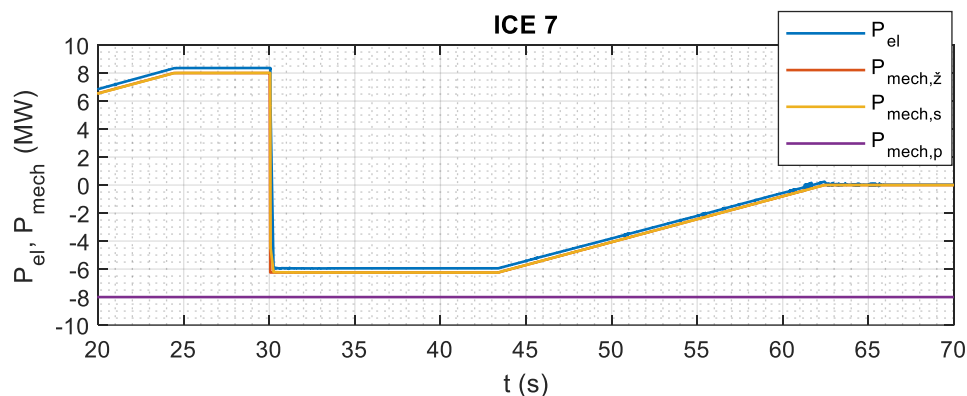
$$I_{omez} = \frac{P_{mar}}{4 \cdot U_{cnom}}, \quad (38)$$

kde U_n je nominální napětí trakční soustavy 25 kV/50 Hz, I_{mar} je marginální proud trakčního vedení při rekuperaci, $\cos(\varphi_1)$ je účinník na první harmonické, P_{mar} je marginální elektrický výkon dodávaný do trakčního vedení a U_{cnom} je nominální napětí stejnosměrného meziobvodu. Každé lokomotivě tak přísluší dodávaný proud z proudového zdroje podle tab. 3.

Tabulka 3 Dodávka proudu z proudového zdroje pro jednotlivá vozidla.

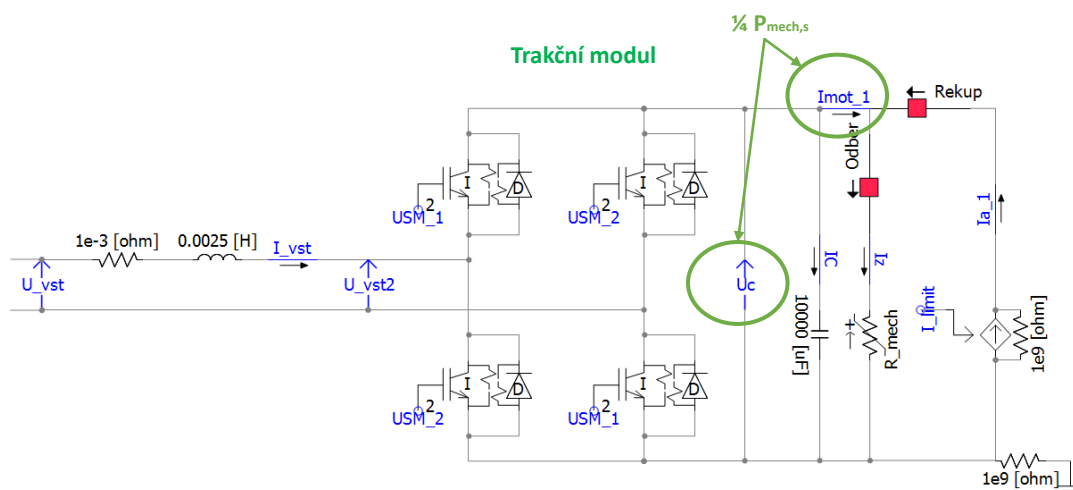
Vozidla	P_n (kW)	P_{mar} (kW)	I_{omez} (A)
380	6400	6250	520,83
Vectron	6400	6250	520,83
640	2040	2040	170
650	1360	1360	113,33
ICE 7	8000	6250	520,83

Jak již bylo zmíněno výše, pokud dané hnací vozidlo nedosahuje mechanického výkonu většího, než je marginální výkon 6,25 MW, je pro dodávaný proud považován aktuální mechanický výkon hnacího vozidla, a tedy $P_{mar} = P_n$. Na obrázku 26 je demonstrován příklad proudového omezení pro elektrickou jednotku ICE 7 a 640 (viz. obr. 29).

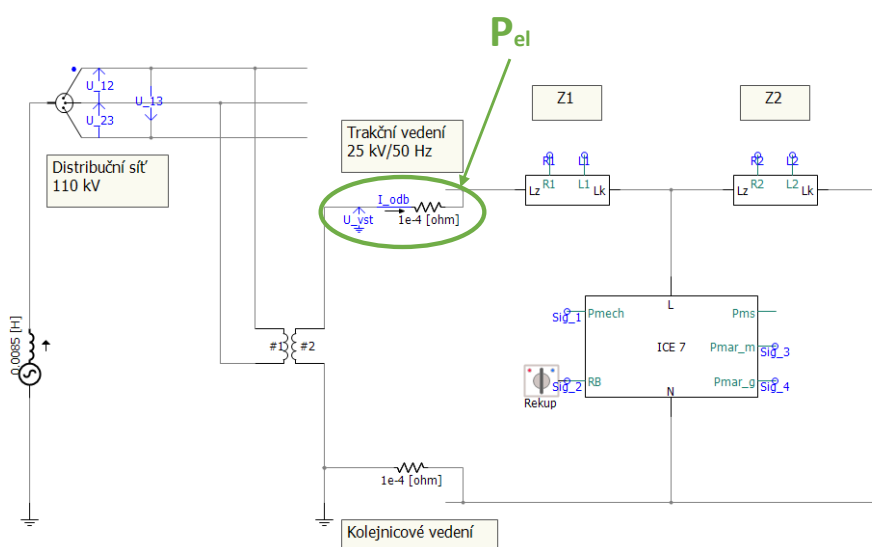


Obrázek 26 Omezení dodávky výkonu do trakčního vedení jednotkou ICE 7.

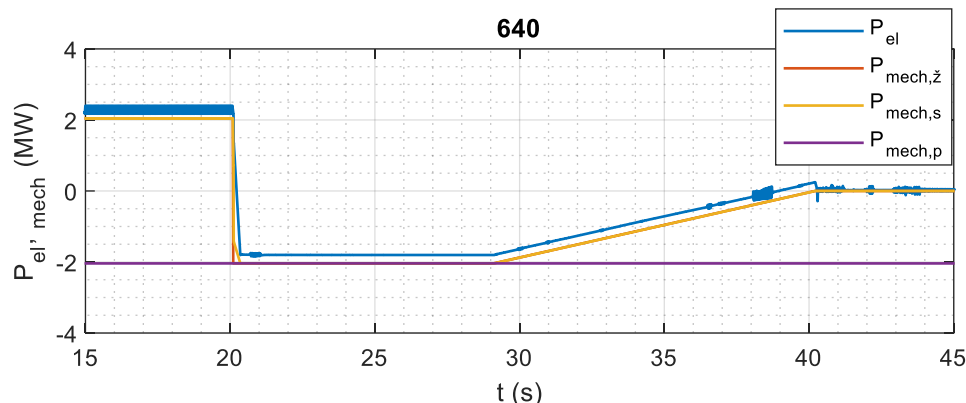
Pro omezení dodávky elektrické energie do trakčního vedení je zapotřebí omezit také mechanický výkon elektrické jednotky při generátorickém režimu. Z toho důvodu jsou pro znázornění omezení mechanického výkonu zavedeny tři veličiny. $P_{mech,z}$ je žádaný mechanický výkon hnacího vozidla, který je výstupem z pohybové rovnice, $P_{mech,s}$ je skutečný mechanický výkon hnacího vozidla, který je měřen na R zátěži v elektrickém modelu a $P_{mech,p}$ je původní maximální mechanický výkon hnacího vozidla při generátorickém provozu bez proudového omezení, který je výstupem z pohybové rovnice. Při proudovém omezení je tedy při generátorickém režimu mechanický výkon omezen z původních 8 MW na 6,25 MW, čímž je zajištěna dodávka proudu do trakčního vedení o velikosti maximálně 250 A. Měření $\frac{1}{4}$ skutečného mechanického výkonu hnacího vozidla je zobrazeno na obrázku 27 a celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení P_{el} je znázorněno na obr. 28.



Obrázek 27 Měření $\frac{1}{4}$ skutečného mechanického výkonu hnacího vozidla.



Obrázek 28 Měření celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení.



Obrázek 29 Rekuperace elektrické jednotky 640.

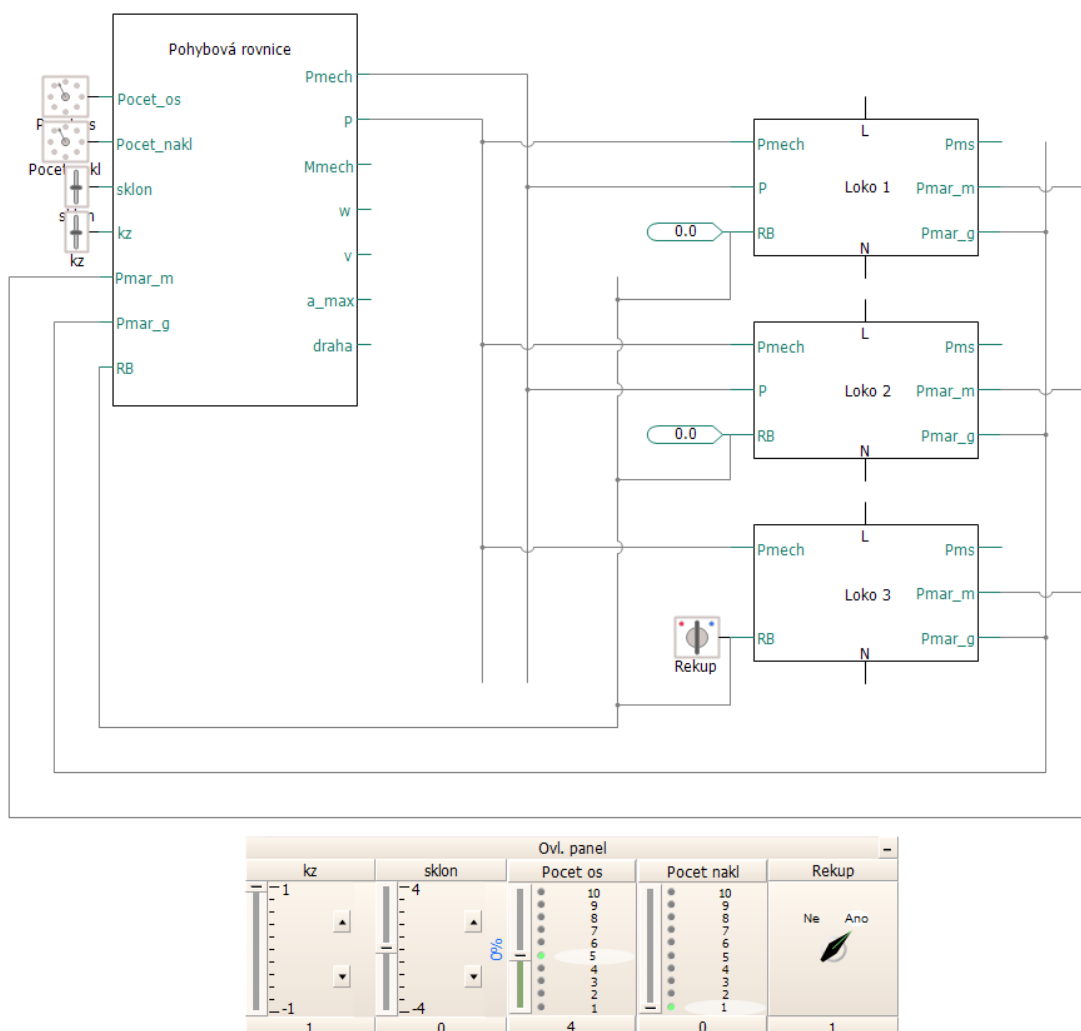
Při brzdění elektrické jednotky řady 640 oproti ICE 7 není rekuperace omezena limitním výkonem, protože dané vozidlo při generátorickém režimu nepřesahuje požadovaným mechanickým výkonem marginální výkon 6,25 MW a tedy $P_{mech,z} = P_{mech,p}$. Odchyšky elektrického výkonu od mechanického výkonu daných vozidel jsou dány ztrátami činného výkonu na impedanci trakčního vedení, a to jak při odběru energie, tak při rekuperaci. Měření celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení a skutečného mechanického výkonu hnacího vozidla je provedeno jako u elektrické jednotky ICE 7. U elektrických modelů, které umožňují rekuperovat elektrickou energii je doplněna závislost omezení mechanického výkonu lokomotivy na volbě režimu brzdění. Pokud není využíváno rekuperační brzdění, mechanický výkon v generátorickém provozu není omezen. Proudové omezení je u modelů Loko 3 zadáváno pomocí proudového omezení v trakčním vedení, které je následně přepočteno na marginální výkon. U všech elektrických modelů je navíc zavedeno proudové omezení i v motorickém režimu. To je do elektrických modelů zadáváno stejným způsobem jako pro generátorický režim.

5.2 Knihovna lokomotiv v PSCADu

S důrazem na přehlednost a pohodlnější manipulaci při výběru jednotlivých lokomotiv pro simulaci je zhotovena knihovna lokomotiv, členěna na tři skupiny s názvy Loko 1, Loko 2 a Loko 3. Každá skupina obsahuje konečný počet lokomotiv s označením a řazením dle reálných hnacích vozidel (viz. tab. 1). Knihovna tedy obsahuje celkem 10 elektrických modelů simulující reálná trakční vozidla, konkrétně řady 242, 230, 362, 363.5, 365, 380, Vectron, 640, 650 a ICE 7. Kromě těchto modelů lokomotiv představující reálná vozidla jsou vytvořeny tři obecné elektrické modely s názvy Loko 1, Loko 2 a Loko 3. Lze tak využít těchto modelů pro simulaci jiných trakčních vozidel, které nejsou uvedeny v tab. 1. Součástí knihovny lokomotiv jsou také vytvořené pohybové rovnice pro vyjmenované řady reálných vozidel. Tyto rovnice jsou defaultně parametrizované dle parametrů reálných vozidel včetně parametrů osobních/nákladních vozů. Je tak vytvořena vazba pohybové rovnice s konkrétním elektrickým modelem,

a tedy celá souprava pro simulaci jízdy vlaku s reálnými parametry. K elektrickým modelům Loko 1, Loko 2 a Loko 3 přísluší pohybová rovnice, jejichž parametrizace není předem určena a může být uživatelem definována libovolně. Mimo parametrizace pohybových rovnic pomocí konstantních parametrů reálných vozidel jsou do rovnice zavedeny i proměnné veličiny, které lze měnit během simulace jízdy vlaku. Proměnné veličiny jsou v podobě ovládacích prvků součástí ovládacího panelu a pomocí uživatelského zásahu lze v průběhu simulace volit scénář jízdy vlaku, např. změnou koeficientu zrychlení k_z , sklonu tratě s . U lokomotiv vybavených rekuperačním brzděním lze také během simulace volit, zda bude rekuperace při brzdění povolena či nikoliv.

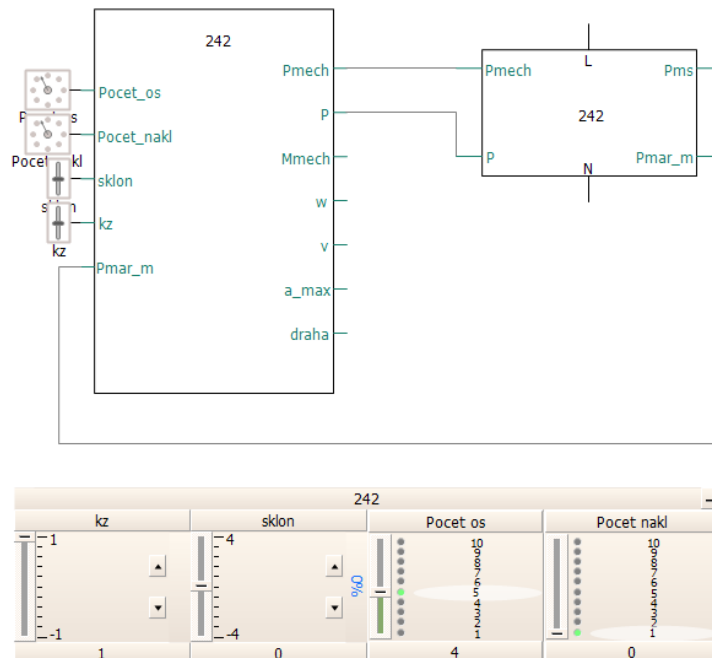
V důsledku takto vytvořené knihovny lokomotiv s pohybovými rovnicemi lze jednotlivá trakční vozidla umisťovat do modelu tratě v libovolném počtu a pořadí do předem určených míst v modelu tratě. Na obrázku 30 je znázorněna část vytvořené knihovny s obecnými modely lokomotiv s pohybovou rovnicí a ovládacím panelem.



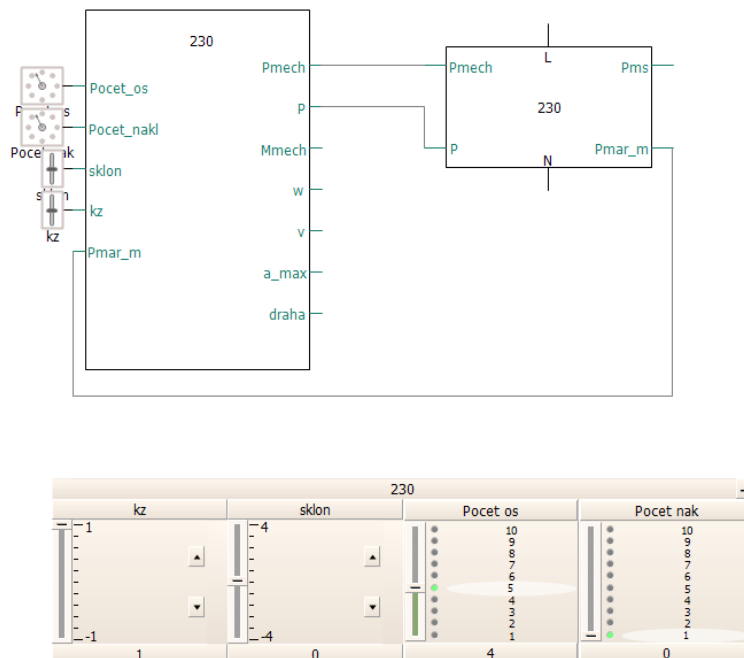
Obrázek 30 Obecné modely lokomotiv s příslušnou pohybovou rovnicí v knihovně lokomotiv.

Obrázek 31 je příkladem části knihovny lokomotiv s reálnými parametry ze skupiny Loko 1 s příslušnými pohybovými rovnicemi a ovládacím panelem.

242



230



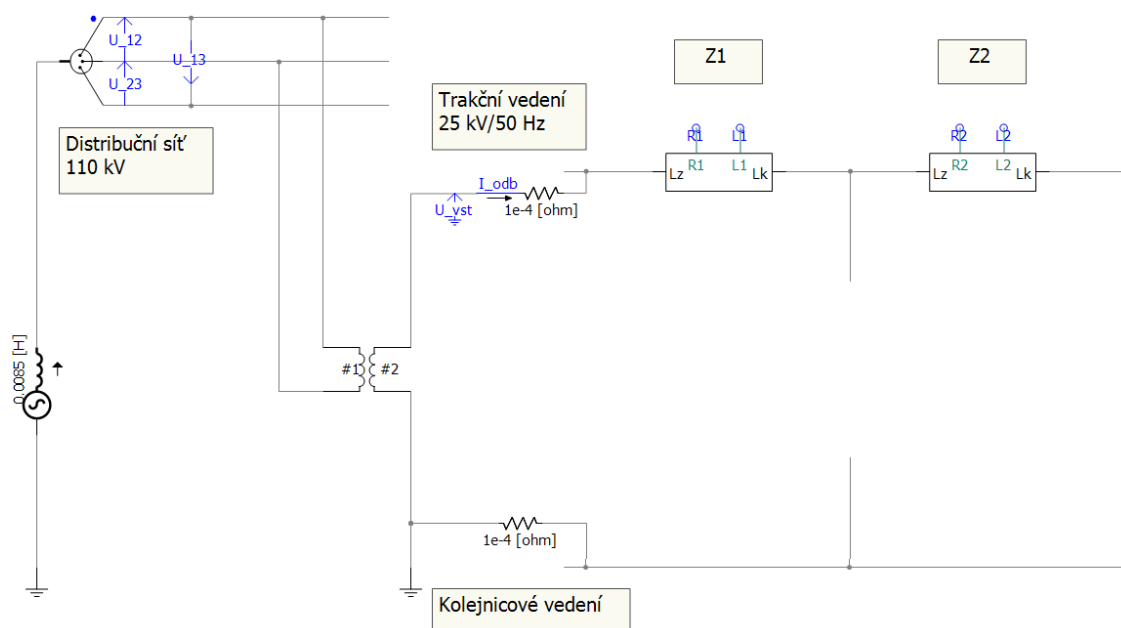
Obrázek 31 Modely lokomotiv ze skupiny Loko 1 s příslušnými pohybovými rovnicemi v knihovně lokomotiv.

6. TVORBA MODELU TRATĚ

Základní součástí pro simulaci provozu jednotlivých vlaků je model jednokolejné tratě, realizovaný pomocí prvků: trakčního vedení, kolejnicového vedení a trakčního napaječe. Pro korektní simulaci toku elektrické energie z hlediska kvantity mezi napaječem a trakčními vozidly je impedance vedení tvořena normovanou hodnotou dle [29], a to $(0,26 + j0,45) \Omega/\text{km}$ pro jednokolejnou trať. Impedance kolejnicového není uvažována z důvodu řádově nižší hodnoty oproti impedanci trakčního vedení. Za trakční napaječe jsou zvoleny dva typy, a sice trakční napaječ v podobě jednofázového střídavého zdroje napětí z knihovny programu PSCAD, simulující statický měnič s efektivní hodnotou napětí 25 kV a trakční napaječ v podobě jednofázového transformátoru, připojeného k DS o napěťové hladině 110 kV. Touto kombinací a vhodnou selekcí napaječů lze realizovat topologii trakčního vedení pomocí jednostranného a dvoustranného napájení.

6.1 Jednostranné napájení

Pro jednostranné napájení je pro model tratě použit typ trakčního napaječe v podobě jednofázového transformátoru, připojeného na DS 110 kV (viz. obr. 32).

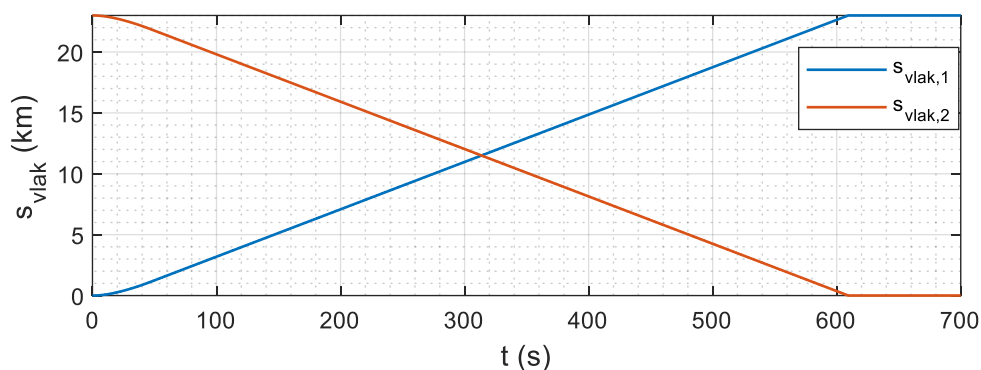


Obrázek 32 Model tratě s jednostranným napájením.

Na obrázku je znázorněna situace, kdy lze do tratě umístit pouze jeden elektrický model lokomotivy, trať je však možné realizovat s provozem více lokomotiv (viz. kap. 7).

Při simulaci provozu lokomotiv je uvažována hodnota impedance trakčního vedení v závislosti na ujeté vzdálenosti daného vlaku. Celková délka tratě je uvažována 23 km od napaječe po konec tratě. Ujetá vzdálenost daného trakčního vozidla je přímo vypočítávána z pohybové rovnice během simulace pro daný vlak. V důsledku toho je při

pohybu vlaku od napaječe směrem ke konci tratě impedance trakčního vedení nalevo od prvního hnacího vozidla Z_1 navyšována o ujetou vzdálenost lokomotivy a impedance trakčního vedení napravo od prvního hnacího vozidla Z_2 klesá s ujetou vzdáleností tak, aby byl simulován pohyb vlaku “zleva doprava“. Při zpětném chodu vlaku jsou impedance vedení vypočítávány opačným způsobem v závislosti na ujeté vzdálenosti vlaku. Do výpočtu hodnoty impedancí Z_1 a Z_2 je zahrnut také počáteční posun vlaku na trati, a tedy lze simulovat situaci, kdy vlak počinaje jízdu od určité vzdálenosti od trakčního napaječe. Na obrázku 33 je demonstrován příklad průběhu ujeté vzdálenosti vlaku pro parametrizaci impedancí trakčního vedení Z_1 a Z_2 .

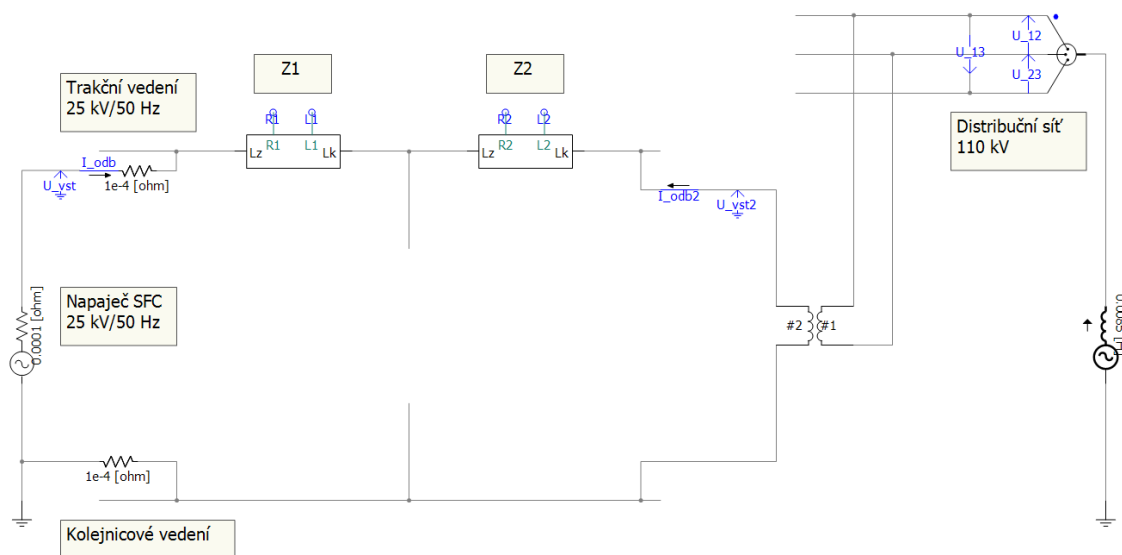


Obrázek 33 Příklad průběh ujeté vzdálenosti vlaku pro parametrizaci impedance Z_1 a Z_2 .

DS je vytvořena pomocí zdroje střídavého trojfázového napětí z knihovny programu PSCAD s efektivní hodnotou sdruženého napětí 110 kV. Indukční reaktance vedení DS je realizována indukčností s hodnotou 8,5 mH, zapojenou v sérii se zdrojem napětí, přičemž zkratový výkon sítě je uvažován s hodnotou 1150 kVA. Vzhledem ke zkratovému výkonu je zvolená hodnota indukčnosti nižší, aby byla zachována tvrdost DS. Takto parametrizovaná DS je použita při všech scénářích provozu (viz. kap.7). Na DS je připojen jednofázový transformátor, konkrétně mezi fází L_1 a L_2 , s jmenovitým výkonem 12,5 MW dle [3].

6.2 Dvoustranné napájení

Oproti modelu tratě s jednostranným napájením je v případě dvoustranného napájení do modelu doplněn druhý napaječ v podobě jednofázového střídavého zdroje napětí s efektivní hodnotou napětí 25 kV, simulující trakční statický měnič (viz. obr. 34).



Obrázek 34 Model tratě s dvoustranným napájením.

Výpočet impedance vedení Z_1 a Z_2 je proveden stejným způsobem jako u jednostranného napájení, kde celková délka tratě od napaječe k napaječi činí 23 km. Pro možnost zapojení dvou technologicky odlišných trakčních napaječů do jednoho napájeného úseku je provedena korekce fázového posunu napětí obou napaječů z důvodu eliminace vzniku vyrovnávacích proudů mezi napaječi.

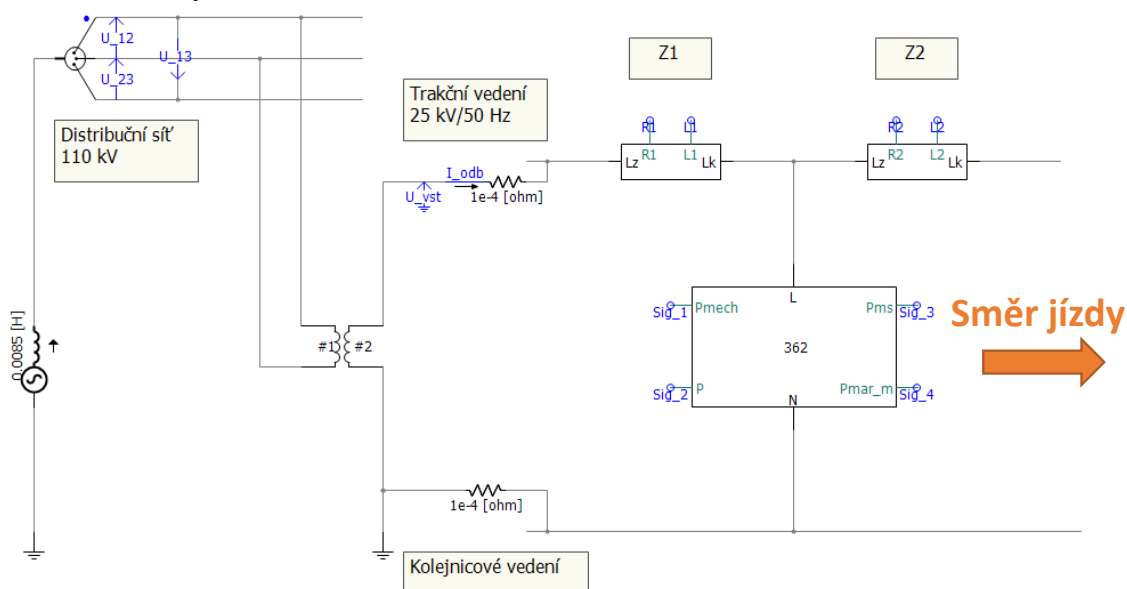
7. DYNAMIKA PROVOZU

Pro konečné posouzení vlivů hnacích vozidel na trakční soustavu 25 kV/50 Hz lze s ohledem na vysokou variabilitu počtu a druhu elektrických modelů, připojitelných do modelu tratě, nasimulovat různé varianty scénářů provozu vlaků na trati. Lze tak sledovat toky elektrické energie v trakčním vedení, vzájemné ovlivnění lokomotiv jak z hlediska kvality odběru elektrické energie, tak směru jejího toku a kvantitu elektrického výkonu. Podle použitých napaječů a počtu disponibilních modelů lokomotiv je model tratě navržen pro čtyři varianty scénářů provozu. V následujících kapitolách budou tyto varianty blíže popsány.

7.1 1 Loko – 1 Napaječ

První variantou provozu vlaků na trati je využití modelu tratě s jednostranným napájením a jednoho elektrického modelu z knihovny lokomotiv. Pro takový případ lze posoudit vliv libovolného jednoho vlaku na trakční vedení. Pro ukázkou provozu jsou v tomto modelu tratě vybrána dvě hnací vozidla pro porovnání zcela odlišné kvality odběru během provozu. První vlak je tvořen lokomotivou řady 362 ze skupiny Loko 2 + čtyři osobní vozy. Druhý vlak je tvořen lokomotivou řady 380 ze skupiny Loko 3 + čtyři osobní vozy.

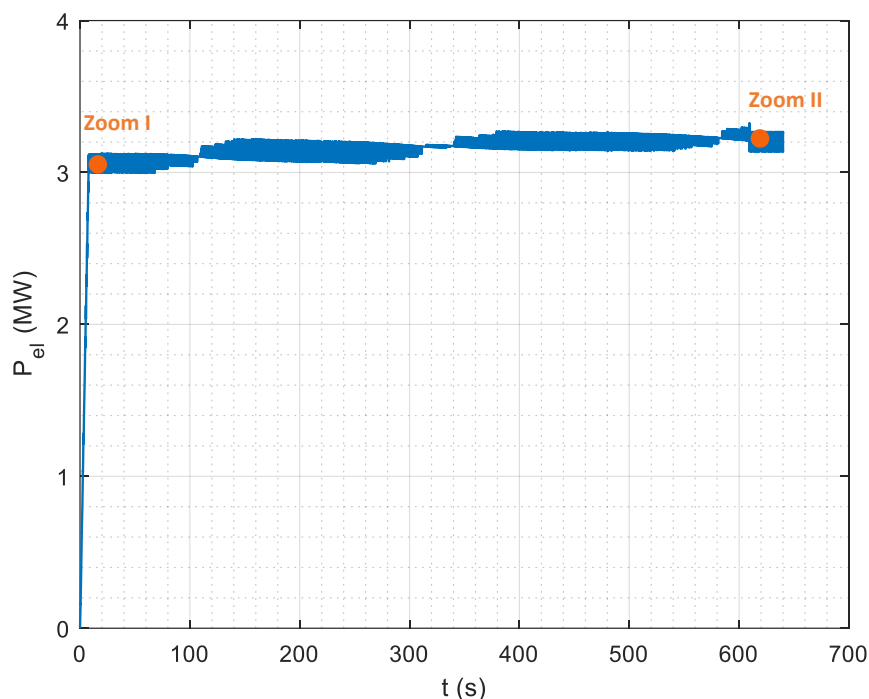
Provoz vlaku vedeného lokomotivou řady 362 je simulován rozjezdem od místa napaječe (viz. obr. 35) s využitím maximálního úhlového zrychlení nápravy a_{max} , a tedy koeficientem zrychlení $k_z = 1$.



Obrázek 35 Model tratě s jednostranným napájením a provozem vlaku s lokomotivou řady 362.

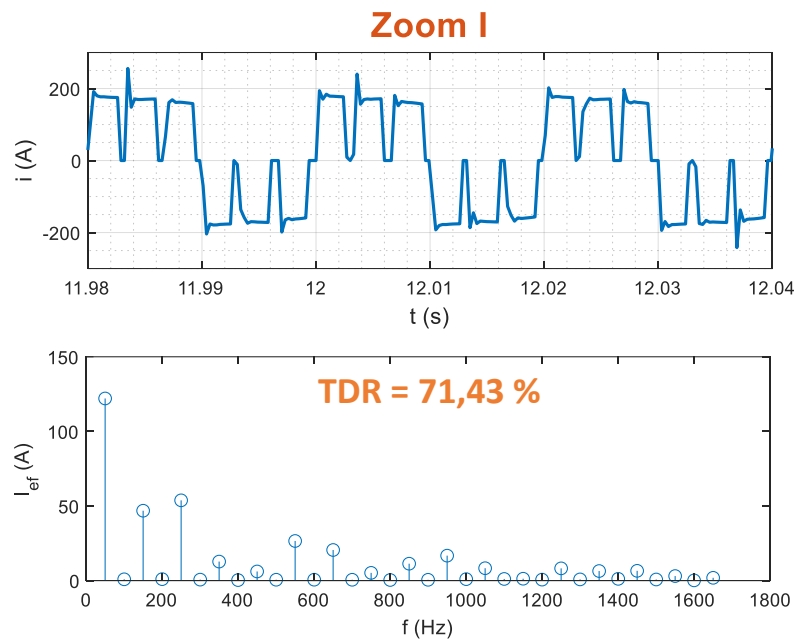
Tento koeficient je v průběhu provozu konstantní z důvodu zatěžování trakčního napaječe působením jmenovitého mechanického výkonu lokomotivy, jakožto

nejnepříznivějšího případu provozu. Na obrázku 36 je znázorněn průběh celkového odebíraného elektrického výkonu z trakčního vedení při nominálním výkonu lokomotivy 3060 kW.

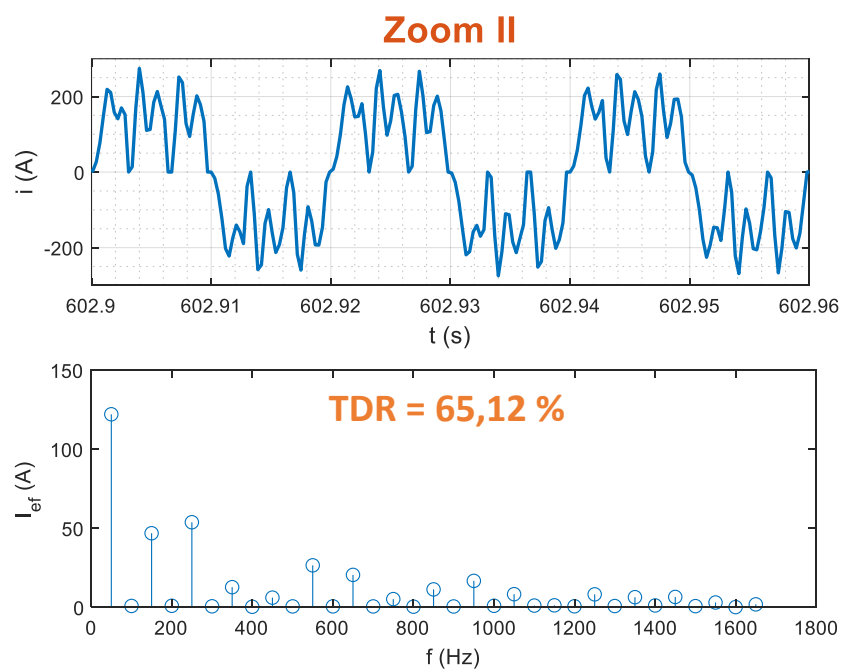


Obrázek 36 Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení.

Z obrázku je patrné, že při provozu vlaků na trati s jednostranným napájením vznikají ztráty činného výkonu na trakčním vedení, konkrétně na impedanci Z_I , umístěné mezi vlakem a trakčním napaječem. Rostoucí impedance Z_I vlivem zvyšování ujeté vzdálenosti vlaku způsobuje úbytek napětí, který rovněž roste s ujetou vzdáleností vlaku. Takto způsobené ztráty činného výkonu jsou kompenzovány zvýšeným odběrem činného výkonu z trakčního napaječe, což je patrné z průběhu odebíraného výkonu. Při nominálním mechanickém výkonu lokomotivy 3060 kW činí odebíraný výkon z napaječe při rozjezdu vlaku na počátku tratě 3079 kW (Zoom I) a při jízdě vlaku na konci tratě 3230 kW (Zoom II). Na obrázku 37 a 38 jsou znázorněny průběhy celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a příslušná spektra průběhů. Na počátku traťového úseku (Zoom I) je průběh odebíraného proudu obdélníkový s modulací spínací frekvencí tyristorového pulzního měniče 300 Hz. Vlivem rostoucí impedance trakčního vedení Z_I je průběh odebíraného proudu ovlivněn rezonancí mezi indukčností trakčního vedení a vyhlazovacího kondenzátoru v trakční výzbroji lokomotivy, čímž jsou vzniklé rezonanční kmity nasuperponovány v průběhu odebíraného proudu (viz. obr. 38). Činitel zkreslení proudu TDR pro Zoom I činí 71,43 % a pro Zoom II 65,12 %.



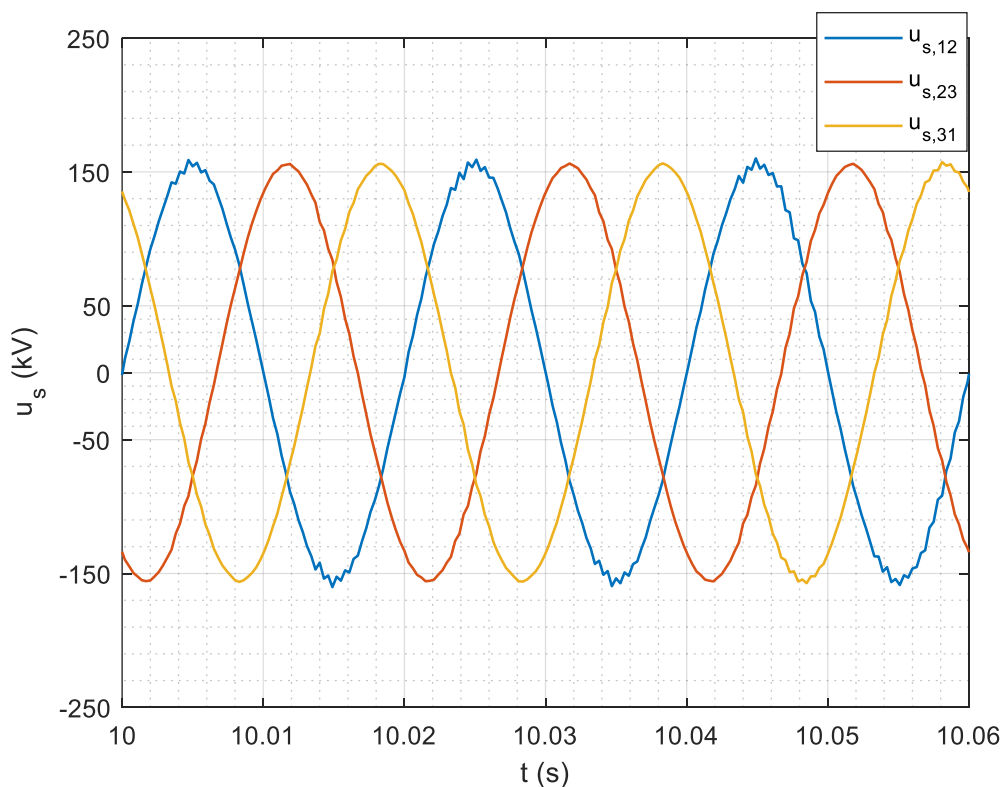
Obrázek 37 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.



Obrázek 38 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.

Při volbě trakčního napaječe, jakožto jednofázového transformátoru s připojením k DS o napěťové hladině 110 kV, je možné vyhodnotit vliv provozu trakčních vozidel také na DS, a sice nesymetrii napětí. Pro posouzení tohoto parametru kvality elektrické energie je v průběhu simulace vypočten součinitel nesymetrie napětí, který je dán

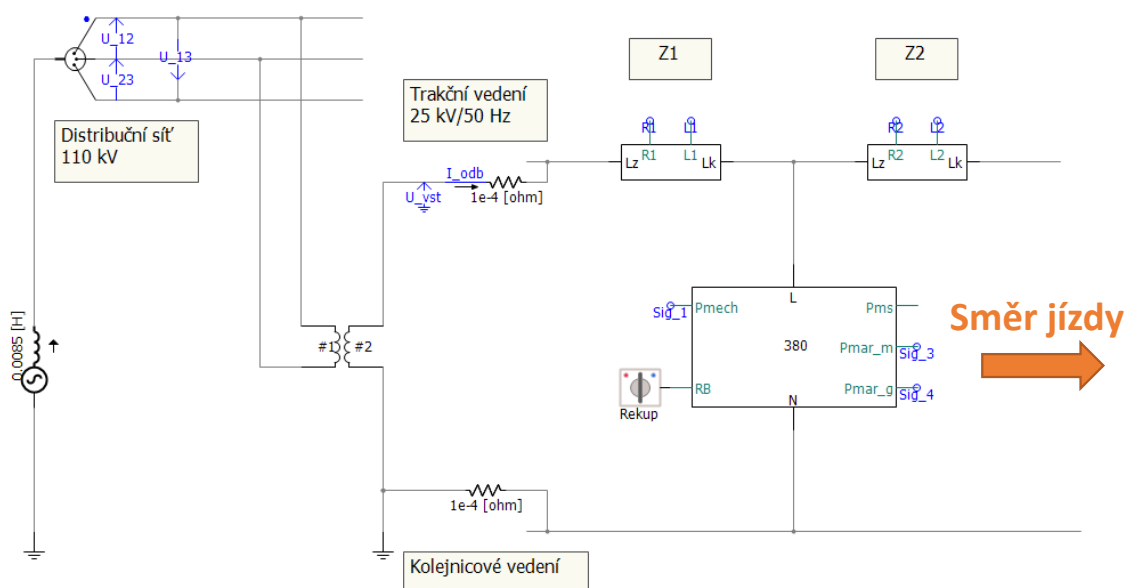
podílem velikostí zpětné složky a sousledné složky napětí první harmonické. Činitel nesymetrie napětí je určen při provozu lokomotivy řady 362 o jmenovitém výkonu 3060 kW. Na obrázku 39 jsou znázorněny průběhy sružených napětí DS o napěťové hladině 110 kV. Lokomotiva řady 362 je při odběru umístěna na konec tratě, aby byl podchycen nejnepříznivější případ nesymetrie, kdy je napáječ zatěžován výkon cca 3,24 MW. Činitel zkreslení je v takovém případě roven



Obrázek 39 Průběhy sružených napětí DS 110 kV.

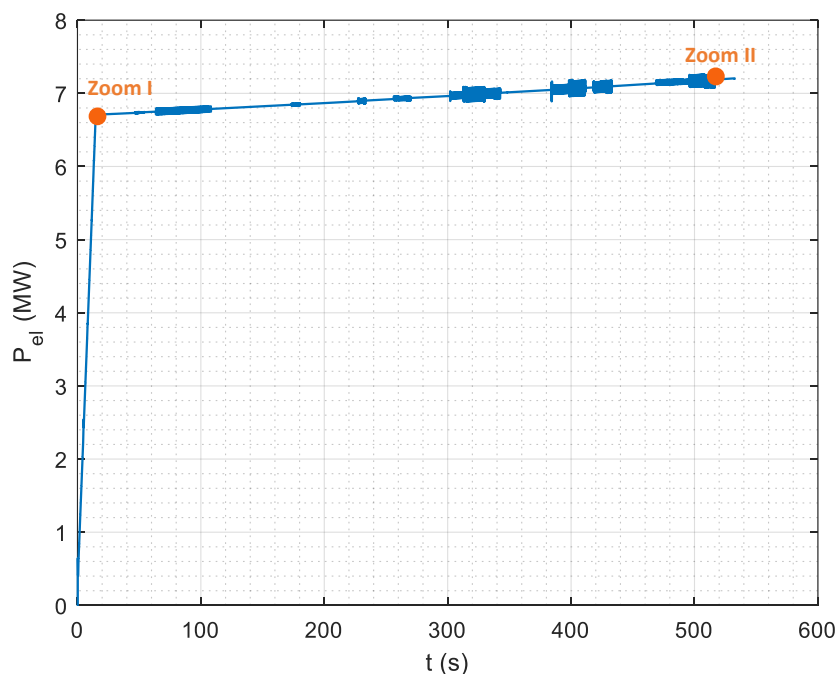
Při provozu lokomotivy řady 362 je nerovnoměrné zatížení DS při jmenovitém výkonu lokomotivy 3060 kW poměrně malé a činitel nesymetrie napětí je roven $7 \cdot 10^{-2} \%$. Z průběhu sružených napětí je patrné zvlnění napětí v DS. Příčinou tohoto zvlnění je oscilace energie mezi kapacitou kondenzátoru v lokomotivě a indukčností napájecí soustavy, tzn. jak s trakční soustavou, tak i s DS. Oscilace energie trakční soustavy s lokomotivou je vidět na obr. 38, a s DS na obr. 37. Podobně je tomu tak v následujících kapitolách.

Provoz vlaku, taženého lokomotivou řady 380 je realizován podobným způsobem, tedy rozjezdem od místa trakčního napáječe (viz. obr. 40) s maximálním úhlovým zrychlením nápravy, a tedy koeficientem zrychlení $k_z = 1$.



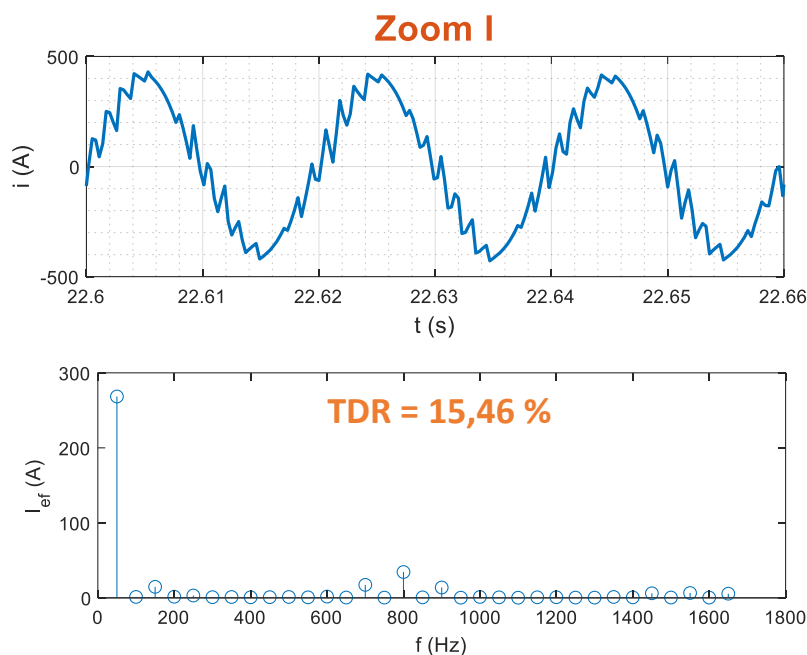
Obrázek 40 Model tratě s jednostranným napájením a provozem vlaku s lokomotivou řady 380.

Lokomotiva řady 380 disponuje větším nominálním mechanickým výkonem v porovnání s lokomotivou řady 362. Koeficient zrychlení je po celou dobu simulace konstantní podobně jako při provozu s lokomotivou řady 362. Na obrázku 41 je demonstrován průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při využití nominálního výkonu lokomotivy 6400 kW.

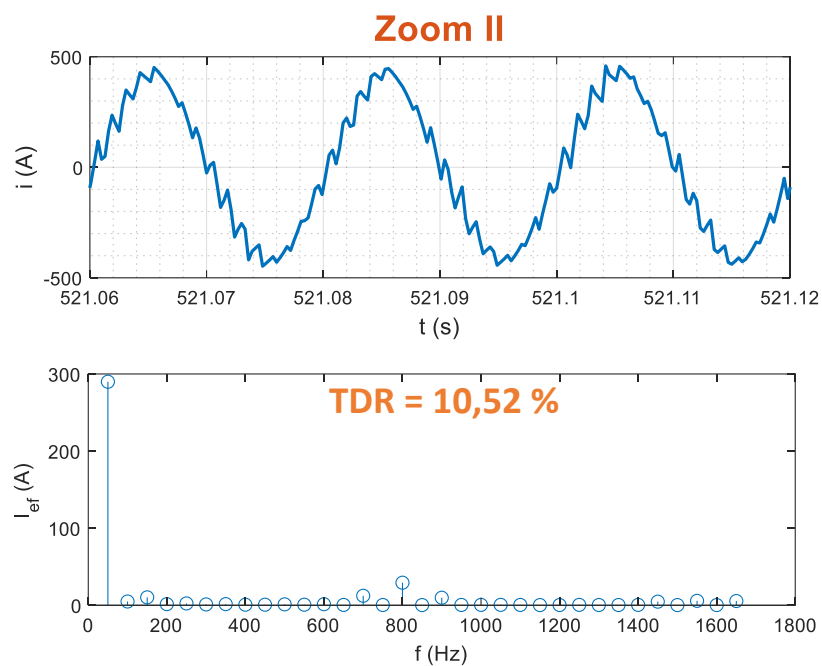


Obrázek 41 Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení.

Při provozu lokomotivy s více jak dvojnásobným nominálním výkonem působí větší ztráty činného výkonu na trakčním vedení. Ztráty činného výkonu na impedanci trakčního vedení Z_I jsou opět kompenzovány zvýšeným odběrem z trakčního napaječe. Odebíraný výkon z napaječe při rozjezdu lokomotivy od napaječe (Zoom I) činí 6725 kW a při pohybu vlaku na konci tratě 7201 kW, čímž ztráty činného výkonu vzrostly na více než dvojnásobnou hodnotu v porovnání provozu s lokomotivou řady 362. Obrázky 42 a 43 ukazují průběhy celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a příslušná spektra daných průběhů. Kvalita odebíraného proudu v části Zoom II je téměř totožná s kvalitou odběru v části Zoom I, přičemž činitel zkreslení proudu TDR je pro oblast Zoom I roven 15,46 % a oblast Zoom II činí 10,52 %.

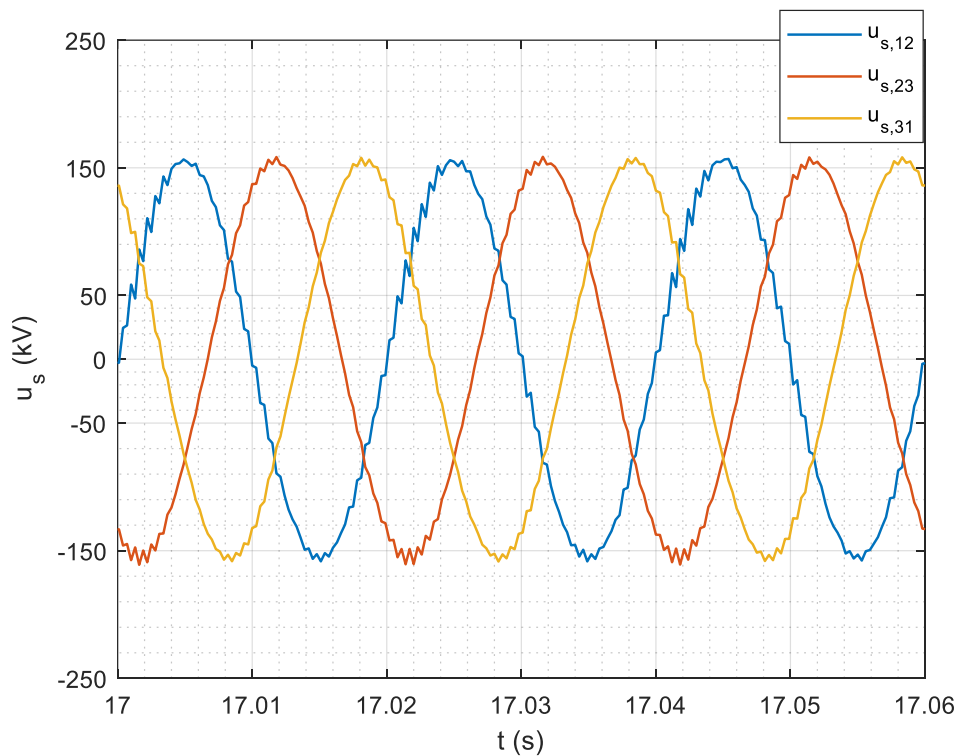


Obrázek 42 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.



Obrázek 43 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.

Na obrázku 44 jsou ukázány průběhy sdružených napětí DS o napěťové hladině 110 kV. V důsledku zatěžování trakčního napaječe výkonem 7,19 MW při pohybu vlaku na konci tratě je činitel nesymetrie napětí roven 0,1601 %.

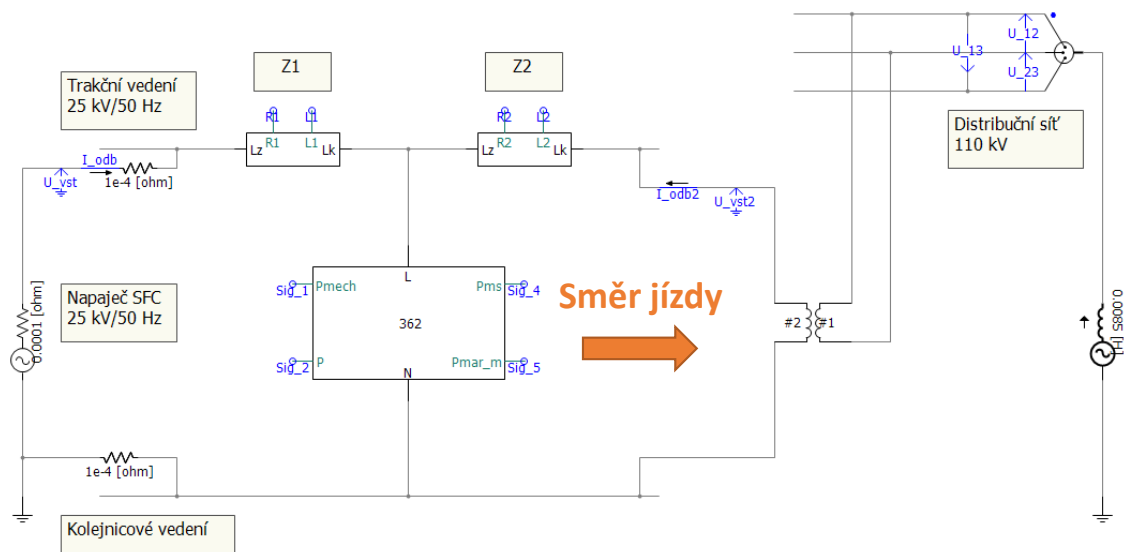


Obrázek 44 Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.

7.2 1 Loko – 2 Napaječe

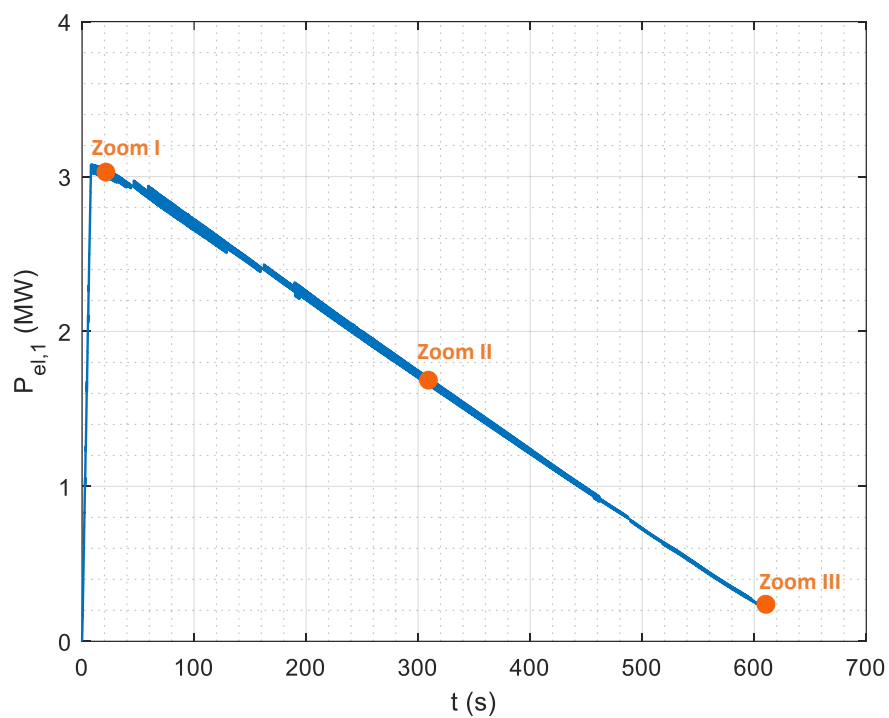
Druhou variantou scénáře provozu je simulace jízdy jednoho vlaku na trati s využitím dvoustranného napájení. Pro simulaci tohoto způsobu je použita pouze konfigurace vlaku s lokomotivou řady 362 z důvodu obdobné kvality odběru obou vlaků jako v předchozí kapitole. V této části je kladen důraz spíše na rozložení dodávaného výkonu mezi dvěma napaječi.

Provoz vlaku je nastaven stejným způsobem jako při provozu s jednostranným napájením. Koeficient zrychlení $k_z = 1$. Jízda vlaku je simulována směrem od trakčního napaječe charakterizující statický měnič k trakčnímu napaječi v podobě jednofázového transformátoru, připojeného k DS (viz. obr. 45).

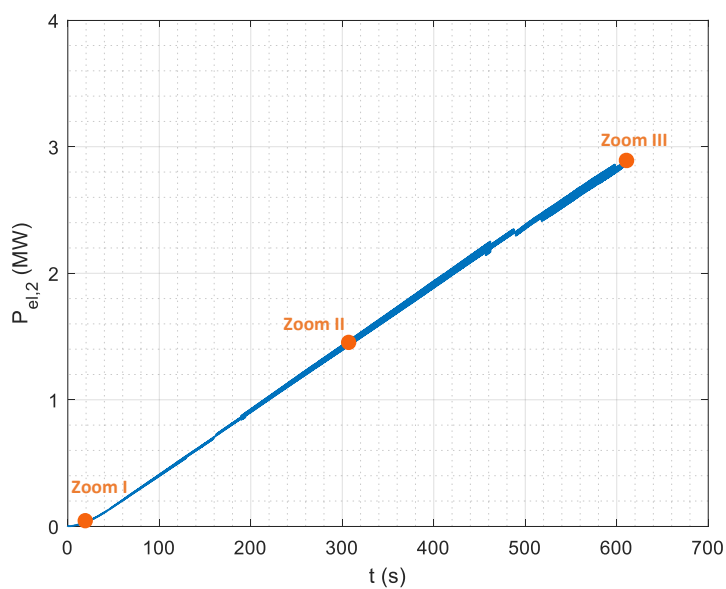


Obrázek 45 Model tratě s dvoustranným napájením a provozem vlaku s lokomotivou řady 362.

Na obrázku 46 je ukázán průběh odebíraného výkonu trakčního napaječe v podobě statického měniče $P_{el,1}$ a na obrázku 47 průběh odebíraného výkonu trakčního napaječe v podobě jednofázového transformátoru $P_{el,2}$. Při vzdalování vlaku od trakčního napaječe charakterizující statický měnič vykazuje odebíraný výkon z tohoto napaječe lineárně klesající trend v důsledku lineárně rostoucí impedance vedení Z_1 mezi trakčním napaječem a hnacím vozidlem. Lineárně rostoucí průběh odebíraného výkonu z druhého trakčního napaječe v podobě jednofázového transformátoru je dán lineárně klesající impedancí vedení Z_2 z důvodu přibližování vlaku k tomuto napaječi.



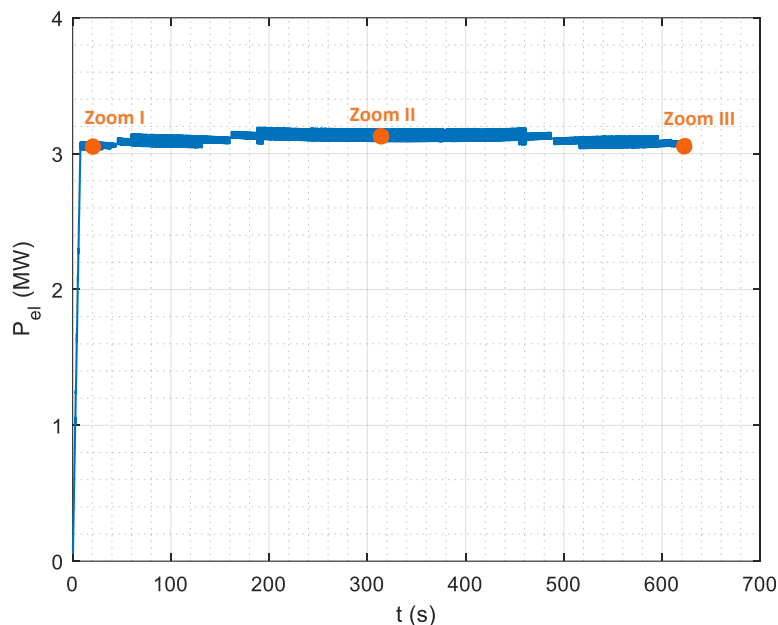
Obrázek 46 Průběh odebíraného výkonu trakčního napaječe v podobě statického měniče.



Obrázek 47 Průběh odebíraného výkonu trakčního napaječe v podobě jednofázového transformátoru.

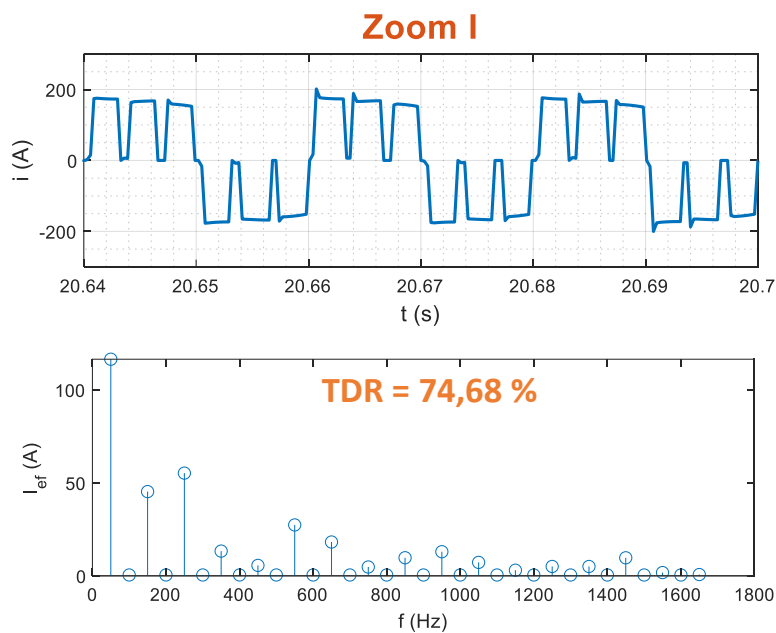
Superpozicí těchto dvou dílčích výkonů dodávaných napaječi do trakčního vedení je získán celkový odebíraný výkon lokomotivou. Na obrázku 48 je zobrazen průběh

celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při nominálním mechanickém výkonu 6400 kW. Je patrné, že maximálních ztrát činného výkonu je dosaženo, pokud se vlak nachází uprostřed traťového úseku mezi oběma napaječi. V daný okamžik je dodávaný výkon obou napaječů stejný pro pokrytí těchto ztrát ve vedení.

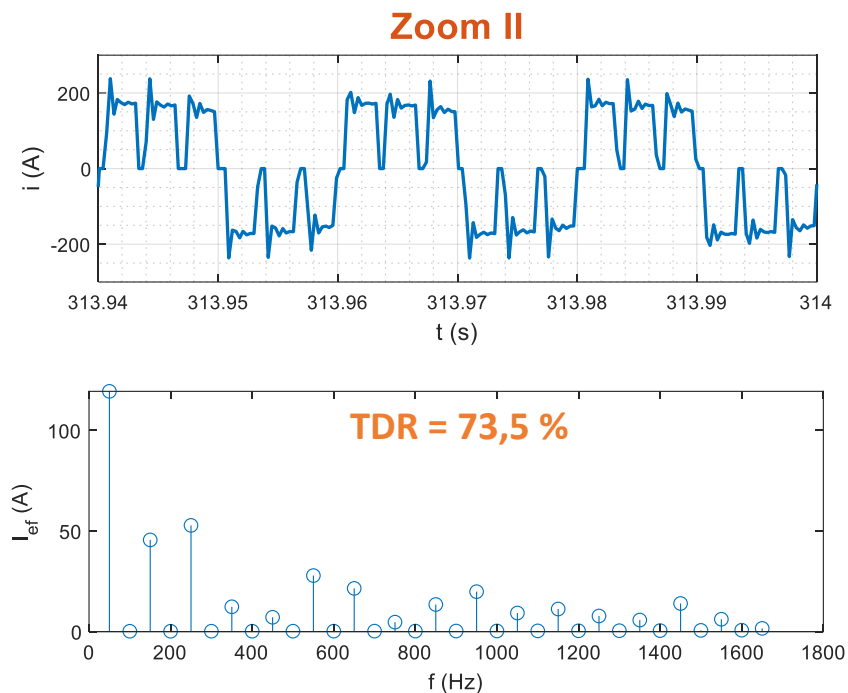


Obrázek 48 Průběh celkového odebíraného výkonu.

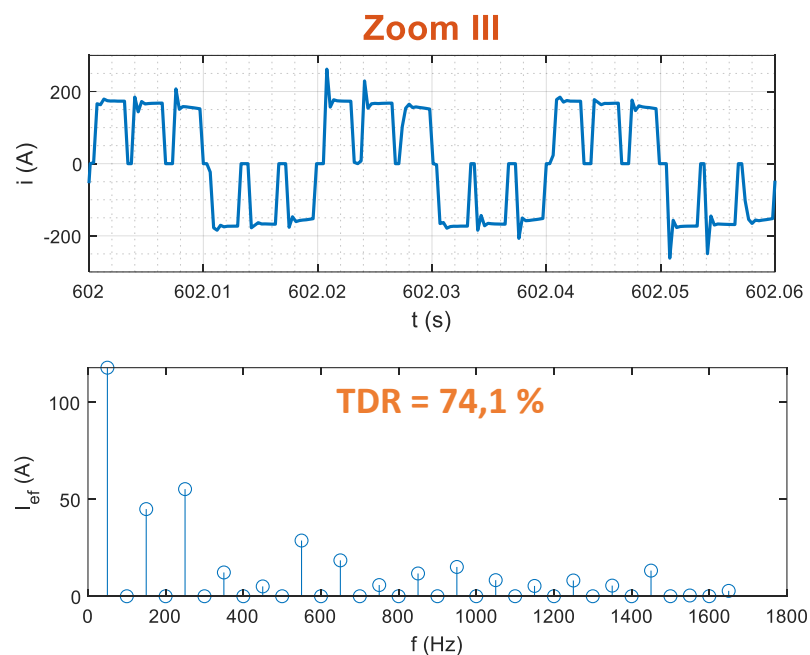
Průběhy celkového odebíraného proudu z trakčního vedení jsou získány superpozicí proudů obou trakčních napaječů. Na obrázku 49 - 51 jsou znázorněny průběhy odebíraného proudu pro jednotlivé oblasti Zoom I, Zoom II a Zoom III.



Obrázek 49 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.

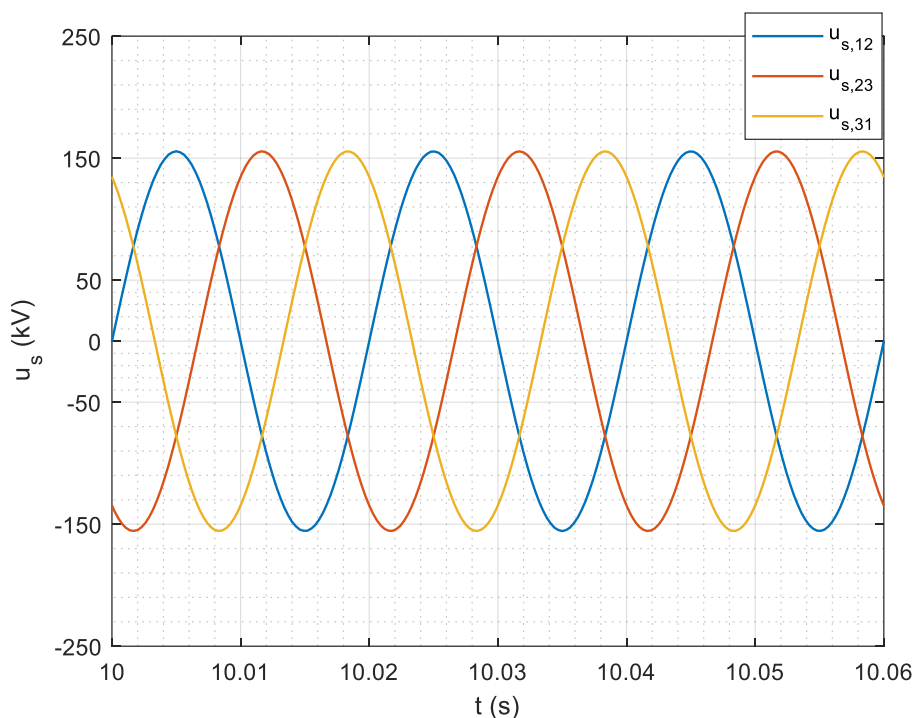


Obrázek 50 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.



Obrázek 51 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom III.

V porovnání s jednostranným napájením jsou rezonanční kmity výrazné, pokud se vlak nachází uprostřed traťového úseku, kde je vliv indukčnosti vedení na rezonanci maximální. Na obrázku 52 jsou znázorněny průběhy sdružených napětí DS o napěťové hladině 110 kV.



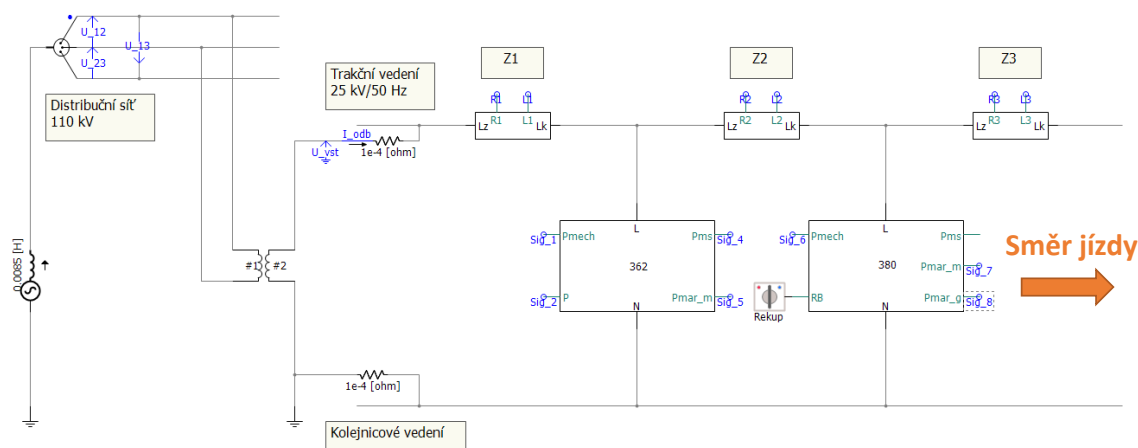
Obrázek 52 Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.

V důsledku rozložení zatížení na dva trakční napaječe je trakční napaječ v podobě jednofázového transformátoru méně zatěžován a činitel nesymetrie napětí při provozu lokomotivy řady 362 činí $2,867 \cdot 10^{-3} \%$, tedy o řád méně v porovnání s provozem při jednostranném napájení.

7.3 2 Loko – 1 Napaječ

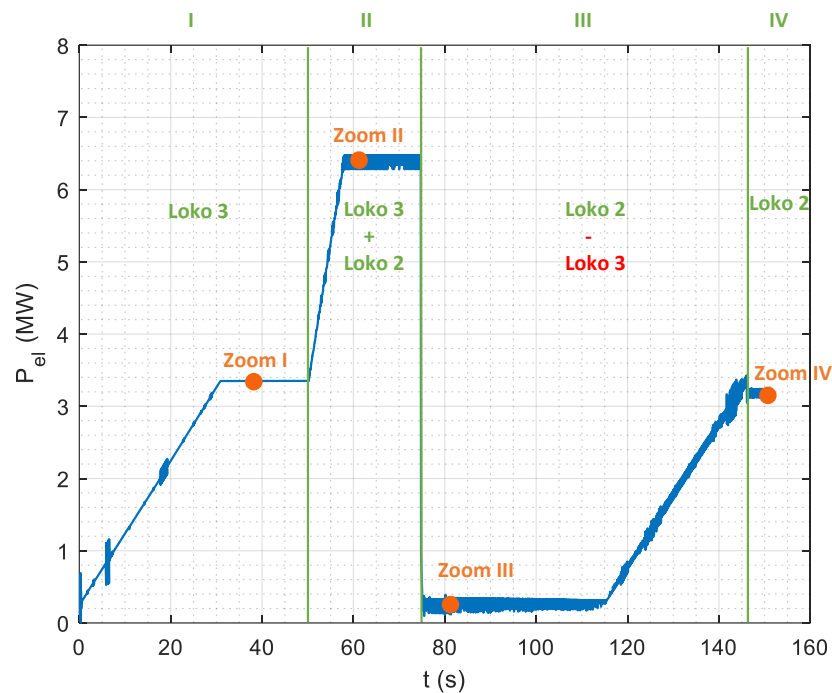
Další variantou scénáře je provoz s jednostranným napájením a využití dvou současně jedoucích vlaků na trati. Model tratě je tak doplněn o impedanci trakčního vedení napravo od druhého hnacího vozidla Z_3 . Jedná se tak o reálnější případ provozu, kdy jsou oba vlaky navzájem ovlivňovány. Pro ukázkou jsou vybrány stejné konfigurace vlaků jako v kap. 7.1, kde byla demonstrována kvalita odběru obou lokomotiv zvlášť.

První vlak s lokomotivou řady 362 je umístěn za vlakem s lokomotivou řady 380, které jedou od napaječe v podobě jednofázového transformátoru (viz. obr. 53).



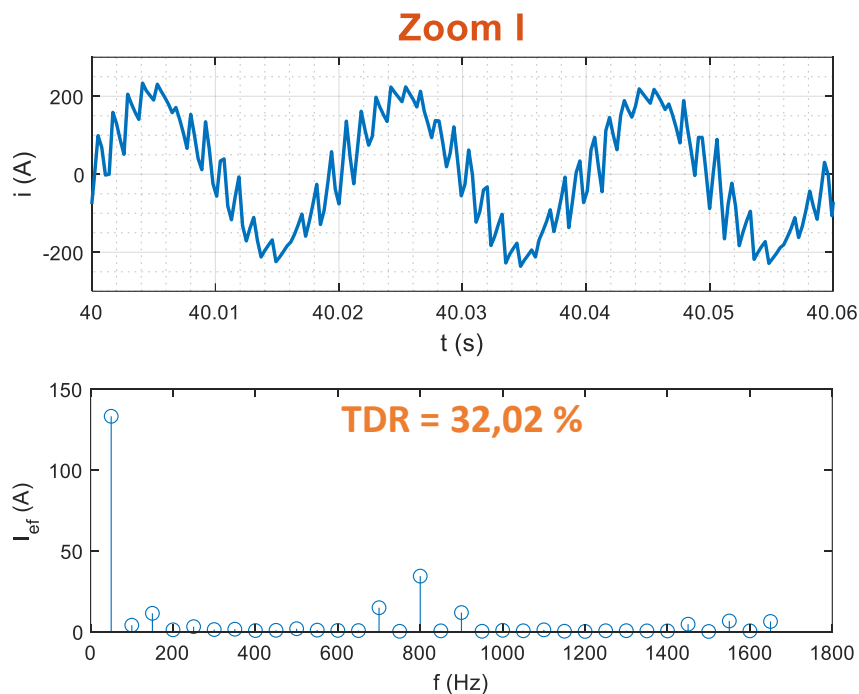
Obrázek 53 Model tratě s jednostranným napájením a provozem vlaků s lokomotivou řady 362 a lokomotivu řady 380.

Na obrázku 54 je znázorněn průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu obou lokomotiv. Scénář začíná rozjezdem vlaku s lokomotivou řady 380 až do výkonu 3060 kW (viz. Zoom I), což je také jmenovitý výkon lokomotivy řady 362. V části II (Zoom II) se výkon odebíraný z trakčního napáječe zvyšuje, protože vlak s lokomotivou řady 362 zvyšuje výkon až na jmenovitý 3060 kW, zatímco vlak s lokomotivou stále odebírá 3060 kW. V části III (Zoom III) se elektrická energie z lokomotivy řady 380 rekuperuje zpět do trakčního vedení o 3060 kW výkonu a lokomotiva řady 362 stále spotřebovává výkon 3060 kW. Výkon dodávaný z lokomotivy řady 380 do lokomotivy řady 362 se během rekuperace snižuje o ztrátový výkon v impedanci Z_2 , který je kompenzován výkonem z napáječe. V poslední části (Zoom IV) lokomotiva řady 380 stojí a lokomotiva řady 362 odebírá jmenovitý výkon 3060 kW. Vlaky jsou na počátku simulace od sebe vzdáleny 6 km.

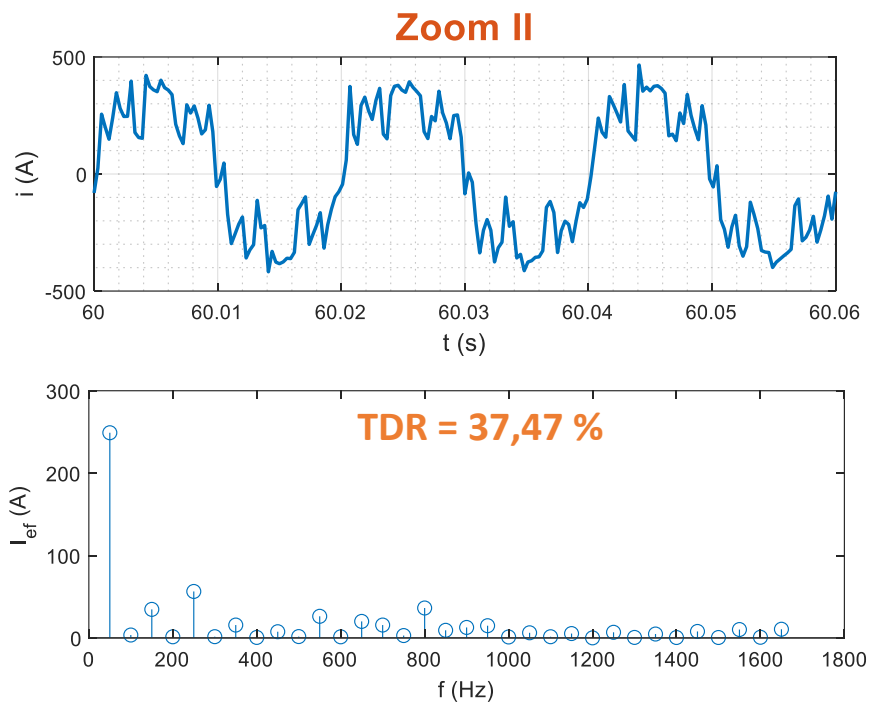


Obrázek 54 Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu vlaků s lokomotivami řady 362 a 380.

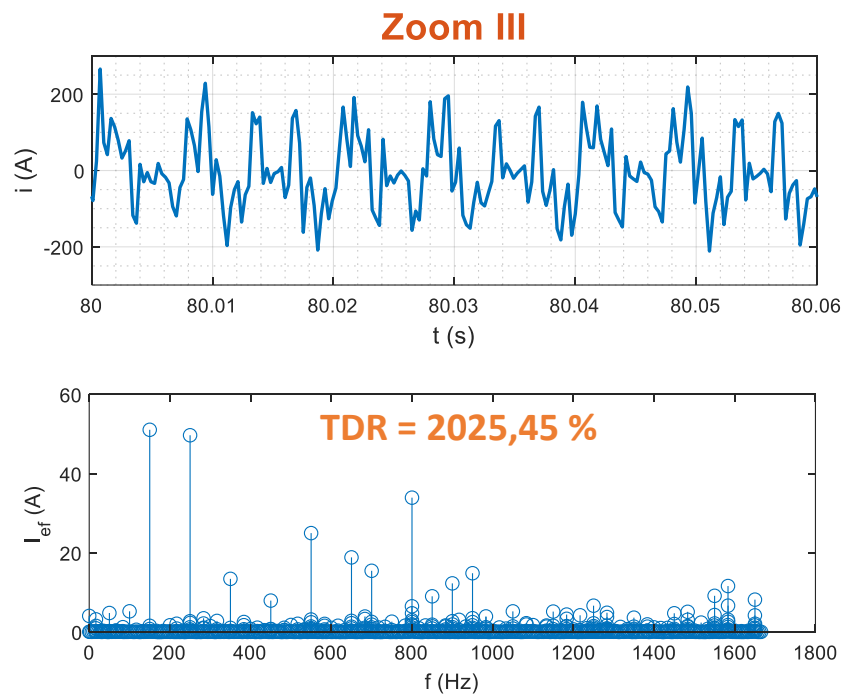
Na obrázku 55 – 58 jsou ukázány průběhy celkového odebíraného proudu z trakčního vedení pro jednotlivé části z průběhu odebíraného výkonu.



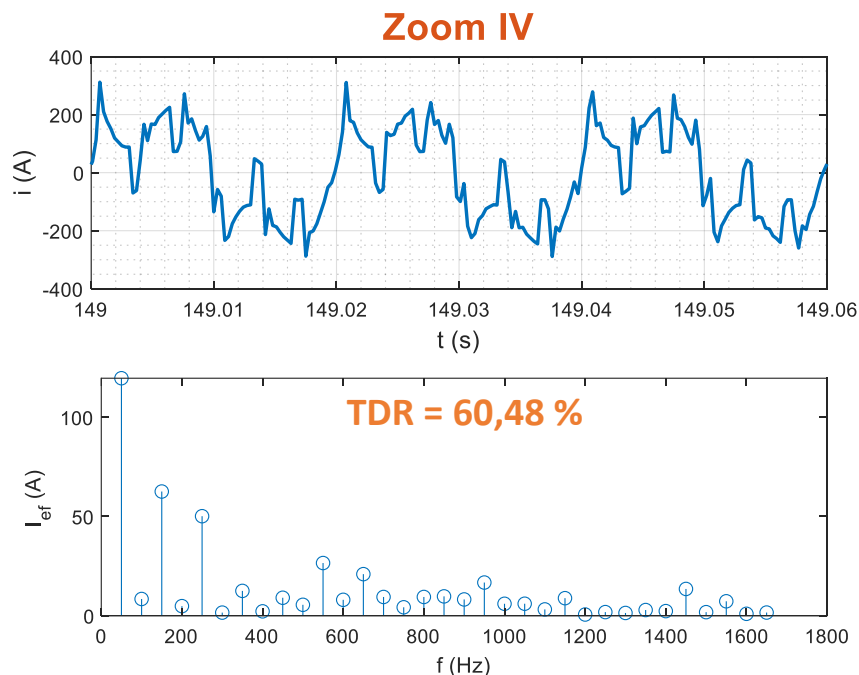
Obrázek 55 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.



Obrázek 56 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.

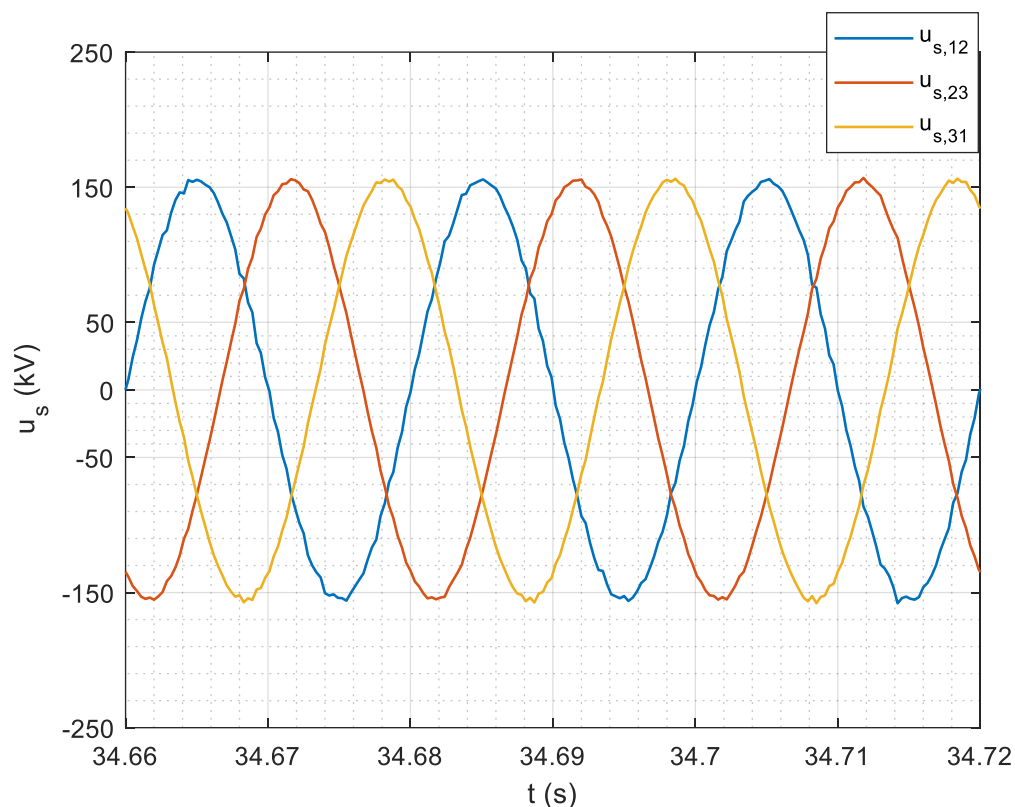


Obrázek 57 Průběh celkového odebíraného proudu a spektrum průběhu pro Zoom III.



Obrázek 58 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom IV.

Vzájemným ovlivněním lokomotiv zcela odlišné kvality odběru dochází ke zkreslení průběhu odebíraného proudu, jakožto superpozice proudu obdélníkového charakteru, modulovaného spínací frekvencí 300 Hz, a proudu sinusového charakteru se superponovaným zvlněním způsobeným pulzně šířkovou modulací. Z jednotlivých průběhů je patrné, že při společném odběru obou lokomotiv (Zoom II) je zkreslení proudu výrazně menší v porovnání s odběrem lokomotivy řady 362 a rekuperací lokomotivy řady 380 výkonem 3060 kW (Zoom III). Efektivní hodnota celkového průběhu odebíraného proudu při společném odběru činí 265,91 A efektivní hodnota první harmonické složky proudu je 249 A, tedy hodnota činitele zkreslení proudu $TDR = 37,47 \%$. Při odběru lokomotivy řady 362 a rekuperačním brzdění lokomotivy řady 380 je efektivní hodnota celkového proudu je 97,34 A efektivní hodnota proudu první harmonické činí 4,8 A. Hodnota činitele zkreslení proudu TDR je rovna 2025,45 %. Na takové zkreslení mají vliv kromě rekuperačního brzdění lokomotivy řady 380 také rezonanční kmity nasuperponované v průběhu odebíraného proudu lokomotivy řady 362 v důsledku zvyšování impedance trakčního vedení Z_l . Na obrázku 59 jsou znázorněny průběhy sdružených napětí DS o napět'ové hladině 110 kV. Zde je z hlediska většího zatěžování DS a projevu nesymetrie simulován provoz lokomotiv s využitím plného potenciálu mechanického výkonu obou lokomotiv, kdy je trakční napaječ zatěžován výkonem cca 11 MW jakožto součet odběrů lokomotiv při společném odběru. Lokomotivy jsou od sebe vzdáleny 6 km a pohybují se na konci trati. Činitel nesymetrie napětí v takovém případě činí 0,249 %.

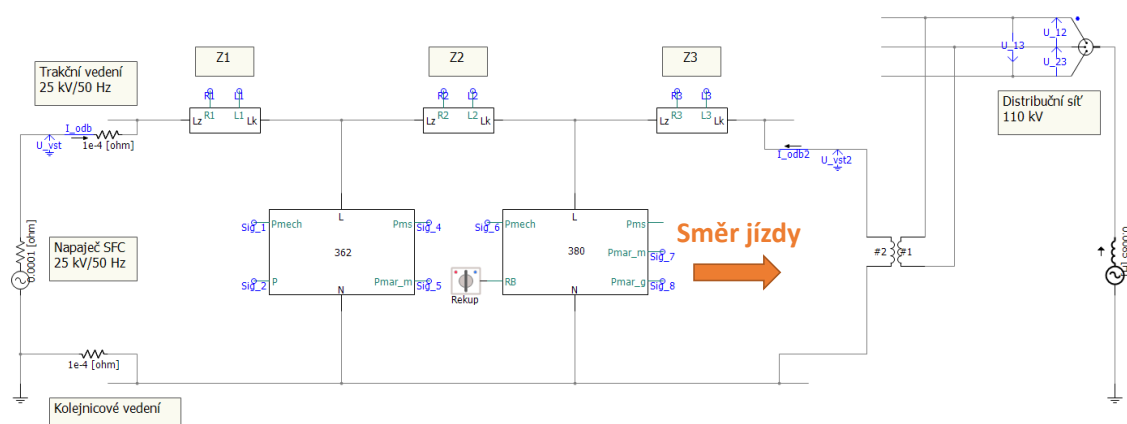


Obrázek 59 Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.

7.4 2 Loko – 2 Napaječe

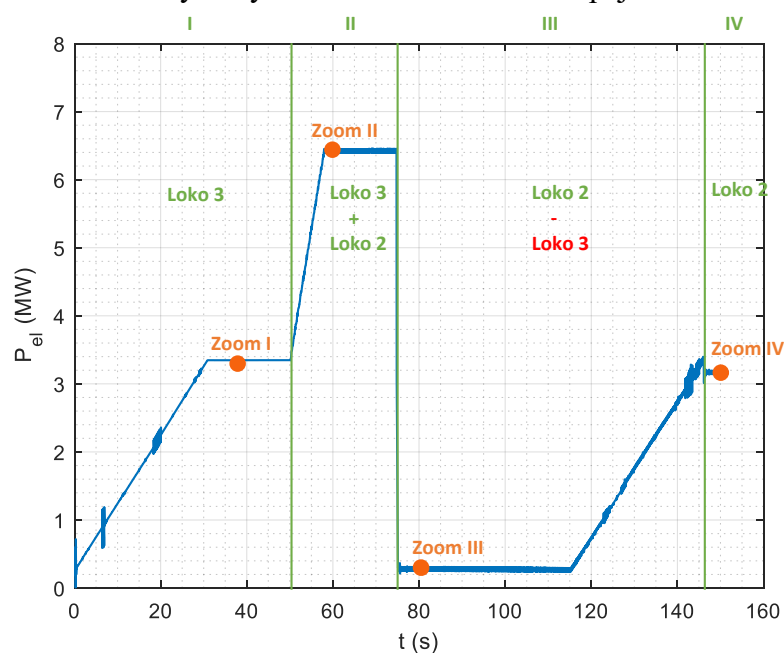
Posledním scénářem je provoz dvou vlaků s využitím dvoustranného napájení. Jedná se o stejný scénář jako v kap.7.3, ale je zde navíc použit druhý trakční napaječ charakterizující statický měnič.

Pro simulaci provozu jsou použity stejné konfigurace vlaků a jejich umístění jako v předešlé kapitole (viz. obr. 60).



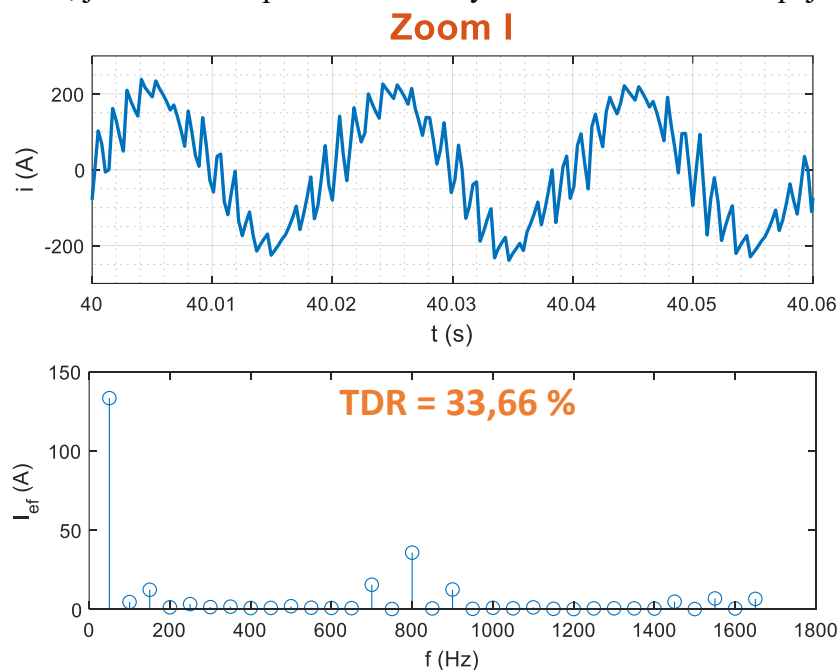
Obrázek 60 Model tratě s dvoustranným napájením a provozem vlaků s lokomotivou řady 362 a lokomotivu řady 380.

Provoz obou vlaků je koncipován stejným způsobem jako v předešlém případě. Na obrázku 61 je znázorněn průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení, jakožto superpozice dodávaných výkonů z obou trakčních napaječů.

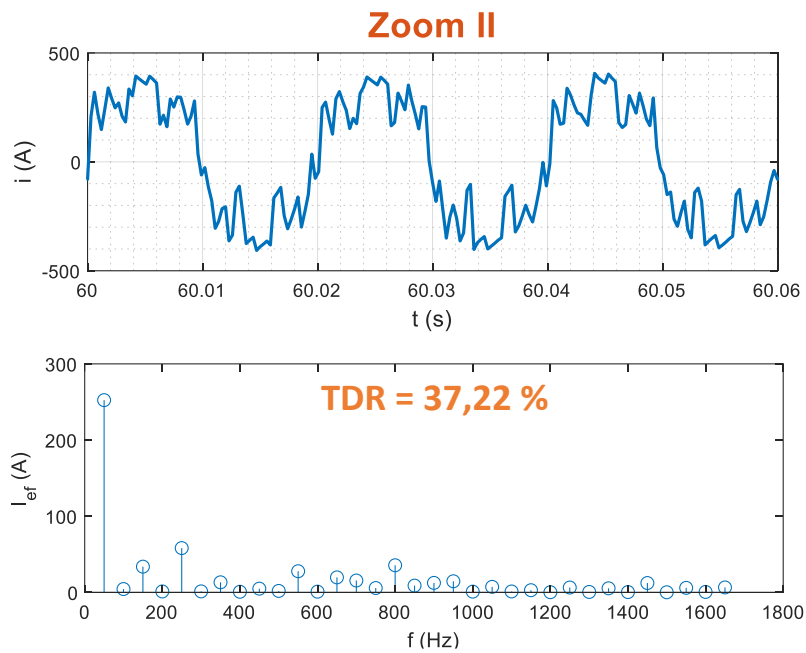


Obrázek 61 Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu vlaků s lokomotivami řady 362 a 380.

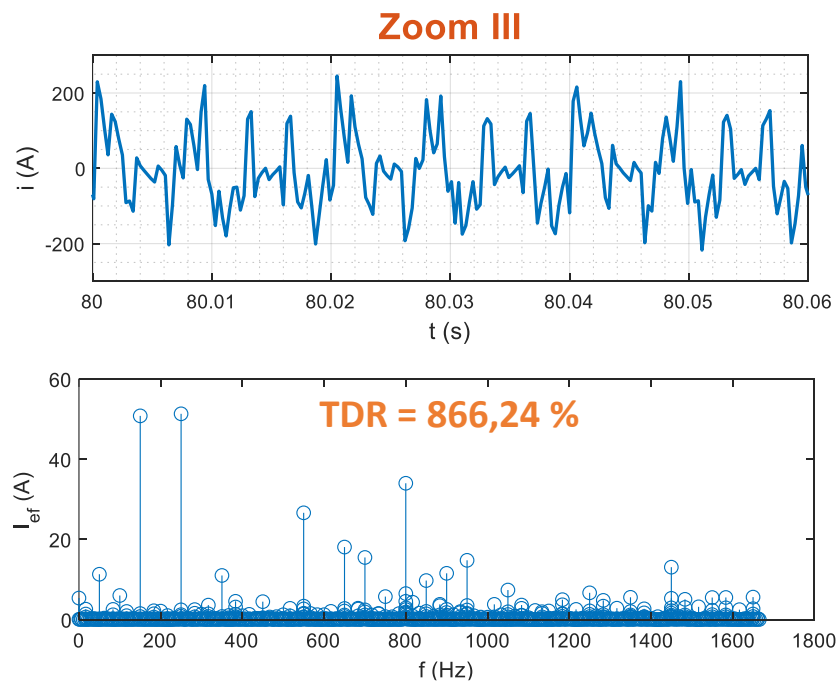
Na obrázku 62 - 65 jsou znázorněny průběhy celkového odebíraného proudu z trakčního vedení, jakožto suma proudů dodávaných oběma trakčními napaječi.



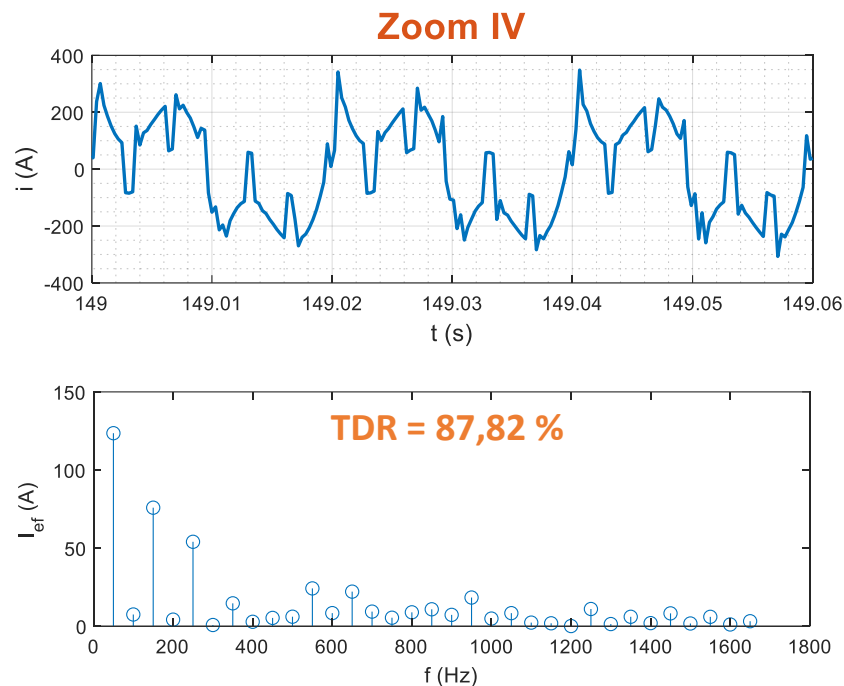
Obrázek 62 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom I.



Obrázek 63 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom II.

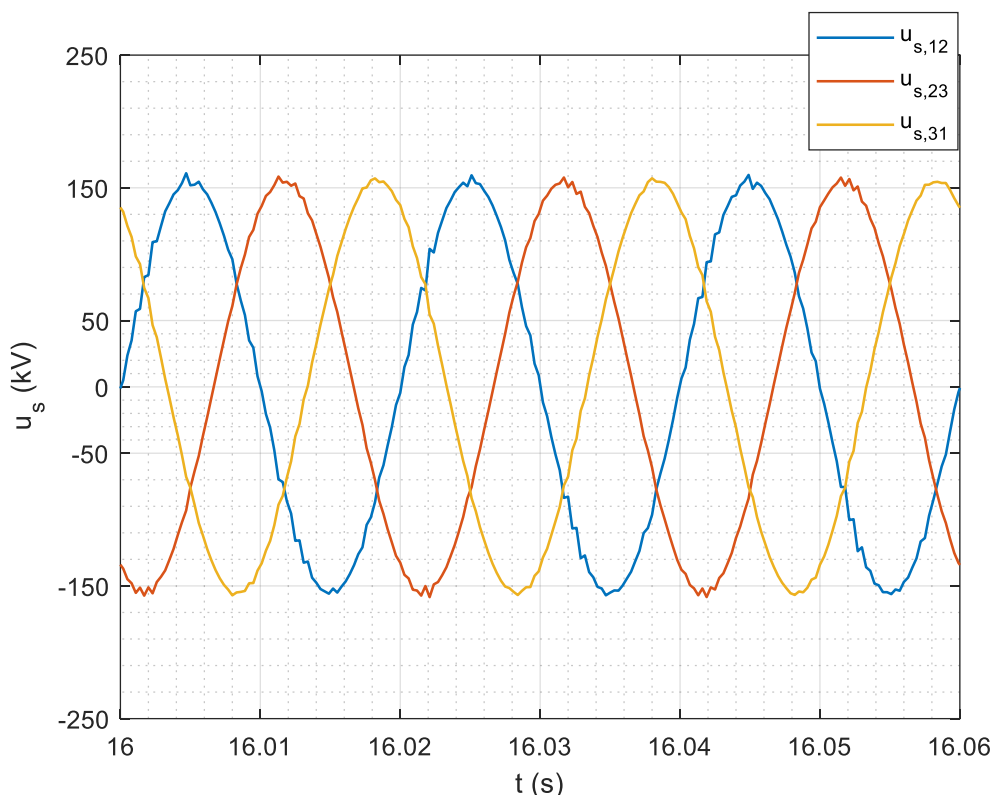


Obrázek 64 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom III.



Obrázek 65 Průběh celkového odebíraného proudu z trakčního vedení a spektrum průběhu pro Zoom IV.

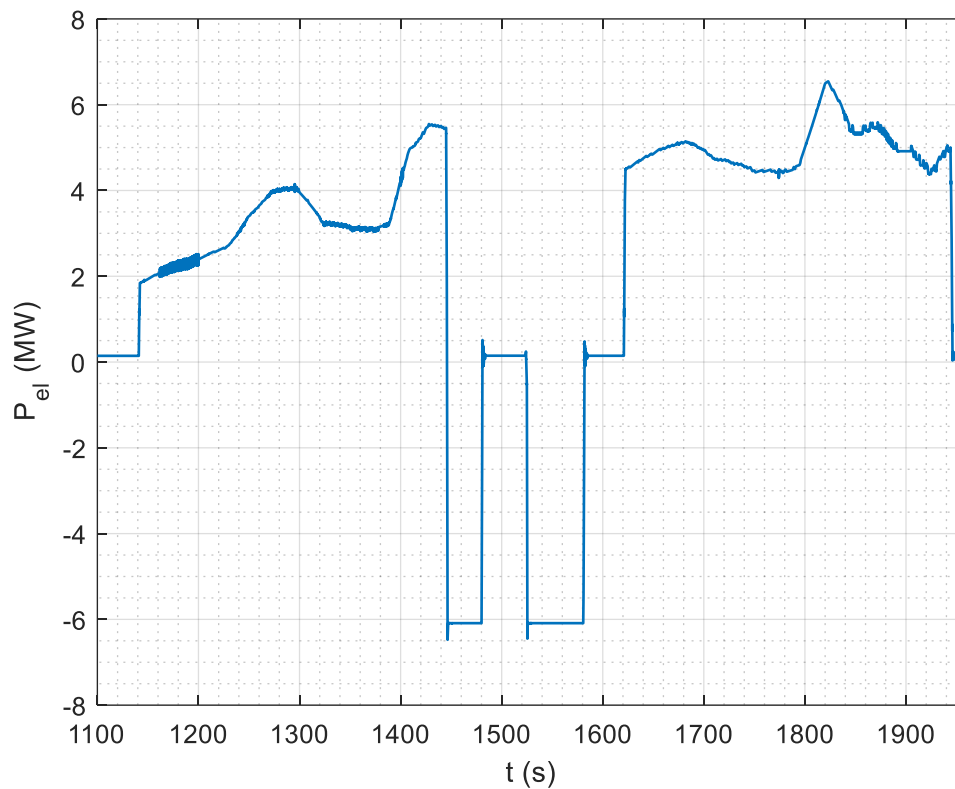
V porovnání s provozem při jednostranném napájení je hodnota činitele zkreslení proudu TDR při současném odběru obou lokomotiv (Zoom II) téměř totožná. Hodnota TDR zde činí 37,22 %. Při odběru lokomotivy řady 362 a současně rekuperaci lokomotivy řady 380 je hodnota činitele zkreslení proudu snížena na 866,24 %. Na obrázku 66 jsou zobrazeny průběhy sdružených napětí DS o napěťové hladině 110 kV. Provoz obou lokomotiv je koncipován stejným způsobem jako v předešlé kapitole pro podchycení nejnepríznivějšího případu, kdy obě lokomotivy se nachází v blízkosti napaječe v podobě jednofázového transformátoru. Činitel nesymetrie napětí činí 0,1842 %



Obrázek 66 Průběhy sdružených napětí DS 110 kV.

7.5 Scénář podle reálného grafikonu

V předchozích kapitolách (7.1 - 7.4) byly popsány scénáře provozu, kde lze nasimulovat libovolný scénář za pomoci manuálního nastavení koeficientu zrychlení a sklonu tratě. Pohybovou rovnici vlaku lze však naparametrizovat podle určitého grafikonu vlakové dopravy pro libovolný vlak. Tato parametrizace přináší zjednodušení především v nastavování koeficientu zrychlení z předem nadefinovaných parametrů, které lze určit z grafikonu vlakové dopravy. Těmito parametry jsou především aktuální rychlost vlaku v daném časovém okamžiku. Z těchto veličin je poté stanoveno aktuální zrychlení vlaku, kterým je pomocí maximálního úhlového zrychlení zjištěn koeficient zrychlení. Není tak třeba uživatelského zásahu do provozu během simulace, kdy je provoz zautomatizovaný. Parametry z grafikonu vlakové dopravy jsou do PSCADu zadávány pomocí textového souboru a následným výpočtem koeficientu zrychlení je do pohybové rovnice nastaven automatický provoz vlaku. Poté lze takto předem nadefinovaný pohyb vlaku využít pro pohybovou rovnici jakéhokoliv trakčního vozidla z knihovny lokomotiv s příslušným elektrickým modelem hnacího vozidla. Pro ukázkou zautomatizovaného provozu je na obrázku 67 znázorněn průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení části scénáře konkrétního nákladního vlaku s 26 vozy a lokomotivou Vectron dle grafikonu vlakové dopravy.



Obrázek 67 Průběh celkového odebíraného výkonu z trakčního vedení při provozu nákladního vlaku dle grafikonu vlakové dopravy.

Z průběhu odebíraného proudu je patrné, že je zde výrazná dynamika provozu v důsledku předem definovaných parametrů zadávaných do pohybové rovnice. Je tak možné simulovat reálnější provoz z hlediska pohybu vlaku na trati.

8. ZÁVĚR

Bakalářská práce byla vytvořena jako podpůrný aparát projektu pro realizaci měniče napájecí trakční soustavy 25 kV/50 Hz na trati 330 v úseku Nedakonice-Říkovice. Hlavní cíl bakalářské práce spočíval ve vytvoření věrohodných modelů lokomotiv, které představují simulační zátěž pro měnič, napájecí trakční vedení o napětí 25 kV/50 Hz. Dle dostupných informací o provozu na trati Nedakonice-Říkovice byla vytvořena banka konkrétních modelů těchto lokomotiv, u kterých je předpokládán budoucí provoz na tomto traťovém úseku. Z důvodu rozmanitosti vozového parku lokomotiv v ČR, a tedy i jejich rozdílné technologie, bylo pro pokrytí takového spektra provozu vybráno několik hnacích vozidel od starší generace až po moderní a v současnosti hojně využívaná vozidla. Soubor vozidel starší generace, využívající navzájem podobnou technologii trakční výzbroje, byl zahrnut do jedné simulační zátěže pod názvem Loko 1. Podobně vozidla, využívající už polovodičovou technologii, byla zahrnuta do jedné skupiny s názvem Loko 2 a vozidla s technologií využívající čtyřkvadrantový měnič byla označena jako Loko 3. Podle reálné topologie trakční výzbroje byly vyhotoveny zjednodušené elektrické modely.

Pro simulaci mechanického pohybu vlaku byla odvozena momentová rovnice vlaku, jejíž vstupem jsou konkrétní parametry vlaku (hmotnost, parametry lokomotivy, druh lokomotivy) a výstupem je mechanický výkon, který je vstupem do elektrického modelu lokomotivy. Výkon je nastavován přepínačem odboček v případě lokomotivy 1, změnou střídavého spínání tyristoru u lokomotivy 2 či změnou odporu zátěže u lokomotivy 3 a tím byly vytvořeny charakteristické průběhy odebíraného proudu. Při provozu lokomotivy 1 je dosaženo téměř obdélníkového průběhu proudu, který se obecně skládá z velkého množství vyšších harmonických složek proudu. Provozem lokomotivy 2 je dosaženo velkého zkreslení odebíraného proudu z trakčního vedení, který je navíc deformován spínáním tyristorů pulzního měniče. Při provozu lokomotivy 3 je průběh odebíraného proudu sinusový se superponovaným zvlněním způsobeným pulzně šířkovou modulací, tlumeným vstupním filtrem. Takový průběh odebíraného proudu obsahuje relativně malé množství vyšších harmonických složek v porovnání s průběhy proudů lokomotivy 1 a 2. Pro simulaci provozu byl sestaven model tratě se čtyřmi variantami provozu za účelem sledování vlivu trakčních vozidel na trakční napájecí soustavu z hlediska kvality odběru, toku energie mezi trakčními napájecími a hnacími vozidly a vlivu na DS z hlediska nesymetrie napětí. Pro posouzení kvality odběru trakčních vozidel byl použit činitel zkreslení proudu *TDR* a pro nesymetrii napětí v DS činitel nesymetrie napětí. Validací odebíraného výkonu při provozu nákladního vlaku s dostupnými daty odebíraného výkonu, která jsou považována za referenci, bylo zjištěno, že kvantita elektrického výkonu z programu PSCAD při odběru energie je nedostatečná, kdy není dosaženo jmenovitého mechanického výkonu lokomotivy. Tato nepřesnost je patrně způsobena zanedbáním aerodynamického odporu při jízdě vlaku na širé trati či odporu při jízdě traťovými oblouky.

Přínosem bakalářské práce je sada parametrizovatelných modelů lokomotiv, které mohou sloužit k hodnocení provozu v trakční soustavě jak z hlediska energetických toků, tak z hlediska kvality odběru. Zjednodušené modely byly částečně ověřeny ukázkovou simulací.

Modely lokomotiv lze použít také pro studium a analýzu interakce hnacích vozidel s filtračně-kompenzačními zařízeními připojenými k trakční soustavě nebo s jinými typy elektrických stanic, např. statickými měniči. Vhodnou restrukturalizací trakční výzbroje modelů lokomotiv lze sledovat vlivy trakčních vozidel i na jiné trakční soustavy, provozovaných v Evropě. Modely jsou univerzální, takže je lze parametrizovat podle jmenovitých parametrů různých hnacích vozidel. Kromě toho lze lokomotivu 3 rozšířit o modely statických měničů různých topologií, které jsou nasazovány v moderních hnacích vozidlech.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AC	Alternating current
ČR	Česká republika
DC	Direct current
DS	Distribuční soustava
GTO	Gate Turn Off
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
Kap	Kapitola
L_1	První fáze distribuční soustavy
L_2	Druhá fáze distribuční soustavy
LC	Induktivní-kapacitní obvod
Loko 1	Lokomotiva 1
Loko 2	Lokomotiva 2
Loko 3	Lokomotiva 3
MC	Multilevel converter
Obr	Obrázek
PI	Proportional Integral
PLL	Phase Locked Loop
R	Rezistorová zátěž
RLC	Zátěž tvořena rezistorem, cívkou a kondenzátorem
TDR	Total distortion ratio
THD	Total harmonic distortion
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí

Symbols:

$\bar{I}_0$	fázor netočivé složky proudu	(A)
$\bar{I}_A$	fázor proudu fáze A	(A)
$\bar{I}_{A0}$	fázor netočivé složky proudu fáze A	(A)
$\bar{I}_{AI}$	fázor sousledné složky proudu fáze A	(A)
$\bar{I}_{AII}$	fázor zpětné složky proudu fáze A	(A)
$\bar{I}_B$	fázor proudu fáze B	(A)
$\bar{I}_{B0}$	fázor netočivé složky proudu fáze B	(A)
$\bar{I}_{BI}$	fázor sousledné složky proudu fáze B	(A)
$\bar{I}_{BII}$	fázor zpětné složky proudu fáze B	(A)
$\bar{I}_C$	fázor proudu fáze C	(A)
$\bar{I}_{C0}$	fázor netočivé složky proudu fáze C	(A)

$\overline{I_{CI}}$	fázor sousledné složky proudu fáze C	(A)
$\overline{I_{CII}}$	fázor zpětné složky proudu fáze C	(A)
$\overline{I_I}$	fázor sousledné složky proudu	(A)
$\overline{I_{II}}$	fázor zpětné složky proudu	(A)
$\bar{a}$	operátor natočení	(-)
a_{max}	maximální úhlové zrychlení	(rad·s ⁻²)
a_z	žádané úhlové zrychlení	(rad·s ⁻²)
C_{dc}	kapacita kondenzátoru meziobvodu	(F)
$\cos(\varphi_1)$	účinník na první harmonické	(-)
$\cos(\varphi_h)$	účinník při dané harmonické složce	(-)
D	deformační výkon	(VAd)
d_{kola}	průměr kola lokomotivy	(m)
f	frekvence	(Hz)
F	tažná síla hnacího vozidla	(N)
F_{max}	maximální tažná síla hnacího vozidla	(N)
g	tíhové zrychlení	(m·s ⁻²)
$G_{cl}^d(s)$	přenos pro uzavřenou proudovou smyčku	(-)
$G_{delay}(s)$	přenosová funkce zpoždění pulzní šířkové modulace	(-)
$G_{PI}^d(s)$	přenosová funkce PI regulátoru proudové regulační smyčky	(-)
$G_f(s)$	přenosová funkce vstupního filtru	(-)
$G_{PI}(s)$	přenos PI regulátoru fázového závěsu	(-)
$G_v(s)$	přenos modelu napět'ového meziobvodu	(-)
$G_{PI}^v(s)$	přenos PI regulátoru napět'ové regulační smyčky	(-)
h	řád harmonické složky	(-)
i	celkový odebíraný proud z trakčního vedení	(A)
i_d^*	žádaná hodnota proudu d-složky z Parkovy transformace	(-)
i_q^*	žádaná hodnota proudu q-složky z Parkovy transformace	(-)
i_2	součinitel nesymetrie proudu	(-)
i_d	skutečná hodnota proudu d-složky z Parkovy transformace	(-)
I_{ef}	efektivní hodnota proudu	(A)
I_{ef1}	efektivní hodnota proudu první harmonické	(A)
I_h	efektivní hodnota proudu dané harmonické složky	(A)
I_I	velikost sousledné složky proudu první harmonické	(A)
I_{II}	velikost zpětné složky proudu první harmonické	(A)
i_{loko}	odebíraný proud lokomotivou	(A)
I_{mar}	marginální proud trakčního vedení při rekuperaci	(A)
I_{omez}	proudové omezení při rekuperaci	(A)
i_q	skutečná hodnota proudu q-složky z Parkovy transformace	(-)
J	celkový moment setrvačnosti vlaku	(kg·s ²)
k_1	proporcionální člen PI regulátoru fázového závěsu	(-)

k_2	integrační člen PI regulátoru fázového závěsu	(-)
k_b	koeficient, který znázorňuje strmost nárůstu momentu pro překonání jízdnicových odporů vlaku	(-)
k_{id}	integrační člen PI regulátoru proudové regulační smyčky	(-)
k_{iv}	integrační člen PI regulátoru napěťové regulační smyčky	(-)
k_{pd}	proporcionální člen PI regulátoru proudové regulační smyčky	(-)
k_{pv}	proporcionální člen PI regulátoru napěťové regulační smyčky	(-)
k_z	koeficient vyjadřující poměr $a_z/a_{\max}$	(-)
L_f	indukčnost vstupního filtru	(H)
$M_A(s)$	mechanický moment závislý na sklonu tratě	(Nm)
m_{lok}	hmotnost lokomotivy či elektrické jednotky	(kg)
$M_{\max}$	maximální mechanický moment hnacího vozidla	(Nm)
M_{mech}	mechanický moment hnacího vozidla	(Nm)
m_{vozu}	hmotnost osobního nebo nákladního vozu	(kg)
n_{vozu}	počet osobních či nákladních vozů	(-)
P	činný výkon	(W)
$p(t)$	okamžitý výkon	(W)
P_1	činný výkon první harmonické	(W)
P_{el}	celkový odebíraný výkon z trakčního vedení	(W)
$P_{el,1}$	odebíraný výkon trakčního napaječe v podobě stat. měniče	(W)
$P_{el,2}$	odebíraný výkon trakčního napaječe v podobě 1f transform.	(W)
P_{mar}	marginální elektrický výkon	(W)
$P_{\max}$	maximální mechanický výkon hnacího vozidla	(W)
P_{mech}	mechanický výkon hnacího vozidla	(W)
$P_{\text{mech,p}}$	původní maximální mechanický výkon hnacího vozidla při generátorickém provozu bez proudového omezení	(W)
$P_{\text{mech,s}}$	skutečný mechanický výkon hnacího vozidla	(W)
$P_{\text{mech,z}}$	žádaný mechanický výkon hnacího vozidla	(W)
P_n	nominální výkon hnacího vozidla	(W)
Q	jalový výkon	(VAr)
Q^*	žádaný jalový výkon	(VAr)
Q_1	jalový výkon první harmonické	(VAr)
R	odpor zátěže	(Ω)
R_f	odpor vstupního filtru	(Ω)
r_{kola}	poloměr kola hnacího vozidla	(m)
s	sklon tratě	(‰)
S	zdánlivý výkon	(VA)
S_1	zdánlivý výkon první harmonické	(VA)
S_{vlak}	ujetá vzdálenost vlaku	(m)
$S_{\text{vlak},1}$	ujetá vzdálenost vlaku pro parametrizaci impedance Z_1	(m)

$S_{vlak,2}$	ujetá vzdálenost vlaku pro parametrizaci impedance Z_2	(m)
t	čas	(s)
T	perioda síťového kmitočtu	(s)
TDR	činitel zkreslení proudu	(-)
T_f	časová konstanta vstupního filtru	(s)
THD_I	činitel harmonického zkreslení proudu	(-)
T_{iv}	integrační časová konstanta	(s)
t_s	doba ustálení fázového závěsu	(s)
T_s	perioda odpovídající spínací frekvenci	(s)
U_1	efektivní hodnota napětí první harmonické	(V)
u_2	součinitel nesymetrie napětí	(-)
U_{cnom}	nominální napětí stejnosměrného meziobvodu	(V)
U_{ef}	efektivní hodnota napětí	(V)
U_h	efektivní hodnota napětí dané harmonické složky	(V)
U_I	velikost sousledné složky napětí	(V)
U_{II}	velikost zpětné složky napětí	(V)
U_n	nominální napětí trakční soustavy 25 kV/50 Hz	(V)
U_{ns}	nominální napětí sekundárního vinutí	(V)
u_s	sdužená napětí DS 110 kV	(V)
$u_{s,12}$	sdužená napětí DS 110 kV mezi fázemi L_1 a L_2	(V)
$u_{s,13}$	sdužená napětí DS 110 kV mezi fázemi L_1 a L_3	(V)
$u_{s,23}$	sdužená napětí DS 110 kV mezi fázemi L_2 a L_3	(V)
v	rychlost hnacího vozidla	(m·s ⁻¹)
V_{dc}^*	žádaná hodnota stejnosměrného napětí meziobvodu	(V)
V_{ac}	napětí sekundárního vinutí transformátoru	(V)
V_d	hodnota napětí d-složky z Parkovy transformace	(-)
V_{dc}	napětí meziobvodu	(V)
V_{dc}	skutečná hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu	(V)
V_m	amplituda napětí sekundárního vinutí transformátoru	(V)
V_q	hodnota napětí q-složky z Parkovy transformace	(-)
V_α	napětí α -složky z transformace Clarkové	(-)
V_β	napětí β -složky z transformace Clarkové	(-)
Z_1	impedance trakčního vedení nalevo od prvního hn. vozidla	(Ω)
Z_2	impedance trakčního vedení napravo od prvního hn. vozidla	(Ω)
Z_3	impedance trakčního vedení napravo od druhého hn. vozidla	(Ω)
θ	synchronizovaná fáze napětí sítě a fáze napětí vytvořené z Parkovy transformace	(°)
λ	celkový účinník odběru	(-)
φ_1	fázový posun mezi napětím a proudem první harmonické	(°)
φ_h	fázový posun mezi napětím a proudem harmonické složky	(°)

ω	úhlová rychlost nápravy	(rad·s ⁻¹)
ω_0	úhlový kmitočet sítě	(rad·s ⁻¹)
ω_{hr}	hraniční úhlová rychlost nápravy	(rad·s ⁻¹)
ω_L	reaktance vstupního filtru	(Ω)

LITERATURA

- [1] LANÁKOVÁ, Gabriela a Dalibor ŠINDLER. *Napájení elektrických dráh*. Bratislava: Alfa, 1989.
- [2] TRÁVNÍČEK, Jaroslav, Miroslav FOGLAR a František HUDEC. *Energetika v dopravě*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1988.
- [3] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy* [online]. 1. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, 2015 [cit. 2022-01-02]. ISBN 978-80-7395-880-0.
- [4] NOVÁK, Jaroslav a Ladislav MLYNÁŘÍK. Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (1. část). *Časopis ELEKTRO* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2020 [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-technologie-trakcniho-napajeni-25-kv-50-hz-1-cast--17232>
- [5] NOVÁK, Jaroslav a Ladislav MLYNÁŘÍK. Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (2. část). *Časopis ELEKTRO* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2020 [cit. 2021-10-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-technologie-trakcniho-napajeni-25-kv-50-hz-2-cast--17263>
- [6] BAGNALL, Trevor, Cosmin BANCEANU a Thomas SCHAAD. *Static frequency converters: the Wulkuraka case* [online]. ABB, 2017 [cit. 2022-01-02].
- [7] Nesymetrie napětí v třífázové distribuční soustavě. *ElektroPrůmysl* [online]. 2021, 10.5.2021, , 1 [cit. 2021-10-17]. ISSN 2571-0761. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/nesymetrie-napeti-v-trifazove-distribucni-soustave>
- [8] *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí: ČSN EN 50160 ED.3*. 2011.
- [9] BLAABJERG, Frede. V. *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 1*. Cambridge: Academic Press, 2018. ISBN 978-0-12-805245-7.
- [10] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances: IEC 61000-2-4:2002*. 2002.
- [11] DE LA ROSA, Francisco. *Harmonics and Power Systems*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8493-3016-5.
- [12] HAŠPL, Viktor. Vyšší harmonické a jejich působení na síť. *Časopis ELEKTRO* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2006 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z:

- <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyssi-harmonicke-a-jejich-pusobeni-na-sit--11949>
- [13] F. FUCHS, Ewald a Mohammad A.S. MASOUM. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Cambridge: Academic Press, 2008. ISBN 9780123695369
 - [14] SCHLABBACH, J a D BLUME. *Voltage Quality in Electrical Power Systems*. Londýn: The Institution of Engineering and Technology, 2001. ISBN 0852969759
 - [15] L. DOKIĆ, Branko a Branko BLANUŠA. *Power Electronics: Converters and Regulators*. 3rd. New York: Springer, 2015. ISBN 3319094017
 - [16] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2005.
 - [17] PATOČKA, Miroslav. *Výkonová elektronika: 1. část-usměrňovače, střídavé měniče napětí*. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
 - [18] LUKEŠ, Pavel. Zlepšení síťového proudu spínaných zdrojů. *Časopis ELEKTRO* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2003 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/zlepseni-sitoveho-proudu-spinanych-zdroju--14622>
 - [19] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0507-9.
 - [20] ŠVESTKA, David. Lokomotiva řady 363 (ES 499.1), 362. *Atlas lokomotiv* [online]. 2005, 2.9.2005 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-363.html>
 - [21] RADIL, Lukáš, Jan KLUSÁČEK, Jiří DVOŘÁČEK a Jiří DRÁPELA. Integrace statických frekvenčních měničů pro napájení AC trakční soustavy do distribuční soustavy z pohledu kvality elektrické energie. *ČK CIREN*. 2021.
 - [22] Napájecí soustavy železnic: Rekuperace. *Check Rail* [online]. 10.1. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.checkrail.cz/napajeci-soustavy-zeleznic-rekuperace/>
 - [23] ŠVESTKA, David. Lokomotiva řady 230 (S 489.0). *Atlas lokomotiv* [online]. 2005, 5.8.2005 [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-230.html>
 - [24] ŠVESTKA, David. Lokomotiva řady 380. *Atlas lokomotiv* [online]. 2010 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-380.html>
 - [25] ŠVESTKA, David. Lokomotivy, jednotky, motorové vozy. *Atlas lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/>
 - [26] EffiLiner 3000. *CZ LOKO: Locomotion Excellence* [online]. [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.czloko.cz/produkty/lokomotivy/effiliner-3000.htm>
 - [27] PAVLÍČEK, Jiří. Elektrická trakce: Trakční mechanika, trakční charakteristiky. *EDUCON* [online]. Plzeň: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky FEL ZČU, 2005 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050201>

- [28] *Pokyn provozovatele dráhy k zajištění plynulé a bezpečné drážní dopravy. Podmínky provozu rekuperace EHV na trakčních soustavách AC 25 kV 50 Hz a DC 3 kV: SŽ PPD-03/2021 – GŘ.* Praha: Správa železnic, státní organizace, 2021.
- [29] *Nastavovanie, prevádzka a udržba reléových ochrán trakčného napájacieho obvodu: Služobná rukoväť, SR 34 (E).* (In Slovak) Praha: Nakladatelství dopravy a spojů