

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

Nízkofrekvenční kolejové obvody a jejich analýza

květen 2018

Diplomant: Patrik Matoušek

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitky proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 25. 5. 2018

.....
podpis diplomanta

Anotace

Práce se zabývá modelováním a analýzou nového typu nízkofrekvenčního neohraničeného kolejového obvodu, který je vyvíjen společností AŽD Praha, s.r.o. ve spolupráci s ČVUT v Praze. Analýzy byly provedeny pro volný, šuntový a několik variant havarijního stavu. Autor provedl rešerši základních typů ohraničených a neohraničených kolejových obvodů a metod jejich analýzy. Dále provedl rešerši modelování zemního lana a odporu půdy v kontextu analýzy havarijního stavu kolejového obvodu. Práce popisuje analýzy těchto stavů pomocí knihovny PraCAN v programu Maple. Obvod je řešen dvěma způsoby, a to s článkovým a dvojbranovým modelem kolejového vedení. Dále je řešeno zajištění ohraničenosti kolejového obvodu pomocí detekce průjezdu vlaku na frekvencích 10 až 50 kHz, a to včetně laboratorního měření parametrů transformátoru DT 0,75 a tlumivky SYT kolejového obvodu na vysokých frekvencích. V posledních kapitolách autor navrhuje optimální kmitočet pro zajištění ohraničení obvodu a také možný způsob detekce jednotlivých náprav.

Klíčová slova

kolejový obvod, neohraničený kolejový obvod, Maple, volný stav, havarijní stav, šuntový stav, dvojbran, článkový model, AŽD Praha, PraCAN

Summary

The work concerns itself with modeling and analysis of a new type of a low frequency jointless track circuit developed by AŽD Praha, s.r.o. in cooperation with CTU in Prague. Analyses were performed for the unoccupied, occupied (shunted) and multiple variants of failure states of the track circuit. The author has done research of literature concerning the basic types of jointed and jointless track circuits and the methods used to analyze them. Furthermore, modeling of earth conductor and the electrical resistance in the track failure scenario in a track circuit was researched. The work describes analysis of these states with the PraCAN library for the Maple PC application. The circuit is solved using two approaches, using a finite element model and a two-port model of the track conduit, respectively. Next the work attempts to solve the problem of bounds in the low frequency jointless track circuit by detecting track vehicle passage using frequencies between 10 to 50 kHz. Properties of certain track circuit equipment (transformer DT 0,75 and choke SYT) at high frequencies were measured to support these analyses. In conclusion, the author proposes the optimal frequency for detecting track vehicle passage and a method to detect the passage of individual gears.

Index items

Track circuit, Jointless track circuit, Maple, Unoccupied state, Failure state, Shunted state, Two-port, Finite element model, AŽD Praha, PraCAN



OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	15
ÚVOD	17
1 CÍL PRÁCE	18
2 KLASIFIKACE KOLEJOVÝCH OBVODŮ	19
2.1 SÉRIOVÝ A PARALELNÍ KOLEJOVÝ OBVOD	19
2.2 ZPĚTNÁ TRAKČNÍ CESTA	20
2.3 KOLEJOVÉ OBVODY BEZ IZOLOVANÝCH STYKŮ	21
2.3.1 NÍZKOFREKVENČNÍ KOLEJOVÉ OBVODY	21
2.3.2 VYSOKOFREKVENČNÍ KOLEJOVÉ OBVODY	22
3 MODELOVÁNÍ KOLEJOVÝCH OBVODŮ	23
3.1 DVOJBRANOVÝ MODEL	23
3.2 OBVODOVÝ MODEL	24
3.3 OBVODOVÝ MODEL S DVOJBRANOU	24
3.4 MODEL TRANSFORMÁTORU DT 0,75 A TLUMIVKY SYT	25
3.5 MODEL ELEKTRICKÉHO KOLEJOVÉHO ÚSEKU	26
3.6 ZAKONČENÍ NEOHRANIČENÉHO OBVODU	30
3.7 MODELOVÁNÍ VOLNÉHO A ŠUNTOVÉHO STAVU	33
3.8 MODELOVÁNÍ PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB	35
3.9 MODELOVÁNÍ HAVARIJNÍHO STAVU	35
3.10 ZPŘESNĚNÍ ANALÝZY HAVARIJNÍHO STAVU POMOCÍ MODELOVÁNÍ ZEMNÍCH PROUDŮ	37
3.11 MODELOVÁNÍ HAVARIJNÍHO STAVU NKO SE ZEMNÍM LANEM	39
3.11.1 SÉRIOVÁ IMPEDANCE LANA	40
3.11.2 SVOD LANA DO ZEMĚ.....	43
3.11.3 SVOD MEZI LANEM A SVRŠKEM	44
3.11.4 ODPOR ZEMĚ MEZI OBLASTÍ ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU A „VZDÁLENÝM MÍSTEM“.....	44
4 ZJIŠŤOVÁNÍ PARAMETRŮ PRO ANALÝZY	45
4.1 PARAMETRY PRO ANALÝZY NA NÍZKÝCH KMITOČTECH	45
4.2 PŮVODNÍ PARAMETRY PRO ANALÝZY NA VYSOKÝCH KMITOČTECH	46
4.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ STYKOVÉHO TRANSFORMÁTORU DT 0,75 A SYMETRIZAČNÍ TLUMIVKY SYT	46
4.4 NOVÉ PARAMETRY PRO ANALÝZY NA VYSOKÝCH KMITOČTECH	50
5 ANALÝZA HAVARIJNÍHO STAVU NKO PRO KMITOČET 75 HZ	51
5.1 ANALÝZA VOLNÉHO STAVU NKO S DVOUBODOVÝM ZAKONČENÍM	51



5.2 ANALÝZA ŠUNTOVÉHO STAVU NKO S DVOUBODOVÝM ZAKONČENÍM	53
5.3 NÁVRH TŘÍBODOVÉHO ZAKONČENÍ KO	53
5.3.1 OVĚŘENÍ KONVERGENCE PROUDU	54
5.3.2 OVĚŘENÍ KONVERGENCE ZAKONČOVACÍ IMPEDANCE.....	56
5.3.3 ZJIŠTĚNÍ HODNOT TŘÍBODOVÉHO ZAKONČENÍ.....	58
5.3.4 OVĚŘENÍ HODNOT TROJBODOVÉHO ZAKONČENÍ	59
5.4 ANALÝZA HAVARIJNÍHO STAVU	59
5.4.1 PROUDY TLUMIVKAMI V ANALÝZE HAVARIJNÍHO STAVU	61
5.5 ANALÝZA HAVARIJNÍHO STAVU S ODPorem UZEMNĚNÍ $R_i = 10 \Omega$	62
5.5.1 OVĚŘENÍ KONVERGENCE PROUDU PRO $R_i = 10 \Omega$	62
5.5.2 OVĚŘENÍ KONVERGENCE ZAKONČOVACÍ IMPEDANCE PRO $R_i = 10 \Omega$	65
5.5.3 ZJIŠTĚNÍ HODNOT TŘÍBODOVÉHO ZAKONČENÍ PRO NKO PRO $R_i = 10 \Omega$	67
5.5.4 OVĚŘENÍ HODNOT TŘÍBODOVÉHO ZAKONČENÍ PRO NKO PRO $R_i = 10 \Omega$	67
5.5.5 ANALÝZA HAVARIJNÍHO STAVU PRO $R_i = 10 \Omega$	68
5.6 ANALÝZA HAVARIJNÍHO STAVU S NULOVÝM SVODEM PŘES PRAŽCE, $R_c \rightarrow \infty$	70
5.7 ANALÝZA HS SE ZEMNÍM LANEM A ODPorem PŮDY	72
6 PODROBNÁ ANALÝZA ŠUNTOVÉHO STAVU.....	78
6.1 ANALÝZA VOLNÉHO STAVU S PODROBNÝM MODELEM	78
6.2 ANALÝZA ŠUNTOVÉHO STAVU	78
7 PODROBNÁ ANALÝZA PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB NA VYSOKÝCH FREKVENČÍCH	79
7.1 ANALÝZA PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB PŘI BUZENÍ NA FREKVENCI 50 kHz – ODEČTENÍ HODNOT NAPĚTÍ VE VZDÁLENOSTI 5, 10 A 20 METRŮ OD IB.	79
7.2 PODROBNÁ ANALÝZA PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB NA 50 kHz S KROKEM ANALÝZY 0,5 A 0,1 M	83
7.3 PODROBNÁ ANALÝZA PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB NA 50 kHz S JINÝM NASTAVENÍM ZDROJE	84
7.4 PODROBNÁ ANALÝZA PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB NA 10, 20, 30 A 50 kHz S NOVĚ ZMĚŘENÝMI PARAMETRY.....	87
7.5 DETEKCE PRŮJEZDU KAŽDÉHO SOUKOLÍ – POČÍTÁNÍ NÁPRAV.	90
8 ZÁVĚR	92
9 CITOVANÁ LITERATURA	93
10 PŘÍLOHY	95
10.1 VÝSLEDKY HRUBÉ ANALÝZY ŠUNTOVÉHO STAVU S ČLÁNKOVÝM MODELEM PRO $f = 75 \text{ Hz}$, $R_s = 0,1 \Omega$, $Y = 0,5 \text{ S}$	95
10.2 VÝSLEDKY PODROBNÉ ANALÝZY ŠUNTOVÉHO STAVU POMOCÍ DVOJBRANOVÉHO MODELU PRO $f = 75 \text{ Hz}$, $Y = 0,5 \text{ S}$, $R_s = 0,1 \Omega$	99
10.3 VÝSLEDKY SIMULACE PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB PŘI FREKVENCI NAPÁJENÍ 50 kHz.....	102
10.4 VÝSLEDKY ANALÝZY PŘEJEZDU VLAKU KOLEM IB NA 50 kHz, S JEMNÝM KROKEM ANALÝZY, PRO RŮZNÉ VLAKY A RŮZNÉ IMPEDANCE ŠUNTU	109



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1-1: Sériový kolejový obvod (překresleno z [1]).....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2.1-2: Paralelní kolejový obvod (překresleno z [1])</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2.2-1: Jednopásový kolejový obvod (překresleno z [1]).....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2.2-2: Dvoupásový kolejový obvod (překresleno z [1]).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3.1-1: Dvojbran s vyznačenými proudy a napětími (překresleno z [7])</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3.3-1: Admitanční model dvojbranu (překresleno z [7]).</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3.4-1: Model transformátoru</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3.4-2: Model tlumivky SYT jako transformátoru (nakresleno dle [7, 10])</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3.4-3: Model transformátoru DT075 (nakresleno dle [10]).....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3.5-1: Schémata EKU1, EKU2, EKU3 (překresleno z [10])</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3.5-2: Schéma podobvodu EKU_cl (nakresleno dle [7]).....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3.5-3: Vnitřní struktura článkového modelu EKU (nakresleno dle [7]).....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 3.5-4: Změna modelu při zavedení zvodu do země</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 3.6-1: Schéma zapojení k měření vstupních impedancí kolejového úseku (překresleno z [12])....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 3.6-2: Zapojení obvodů pro zjištění přibližné vstupní impedance nekonečného kolejového úseku</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 3.7-1: Model NKO pro analýzu volného stavu</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 3.9-1: Obvodový model NKO pro analýzu havarijního stavu s vyznačeným lomem kolejnice napravo od HB (překresleno z [12])</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 3.10-1: K výkladu zemního proudu – rozložení proudového pole pro dvě kulové elektrody v homogenním médiu [14]</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 3.10-2: K ilustraci optimalizovaného modelu země modelované metodou konečných prvků.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 3.11-1: Schéma jednoho článku v článkovém modelu koleje se zemním lanem a odporem země. 39</i>	
<i>Obrázek 3.11-2: K výkladu Rūdenbergovy koncepce (převzato z [20]).....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 3.11-3: K Vysvětlení svodu zemního lana (překresleno z [22]).....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 3.11-4: Ilustrace svodu mezi dvěma vodiči (překresleno z [23]).....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 4.3-1: Schéma zapojení pro měření parametrů transformátoru.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.1-1: Relativní chyba amplitudy δx sledovaných veličin oproti výsledkům s dvojbranovými modely dle [11] v závislosti na počtu článků na 500 m koleje (v procentech) pro $Y_p = 0,5 S$.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 5.1-2: Chyba fáze $\Delta\varphi$ sledovaných veličin oproti výsledkům s dvojbranovými modely dle [11] v závislosti na počtu článků na 500 m koleje (ve stupních) pro $Y_p = 0,5 S$</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 5.3-1: Změna amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v prvním (levém) informačním bodě v závislosti na délce analyzovaného úseku pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 5.3-2: Změna amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v hlavním bodě v závislosti na délce analyzovaného úseku pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$.....</i>	<i>55</i>



Obrázek 5.3-3: Změna amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v druhém (pravém) informačním bodě v závislosti na délce analyzovaného úseku pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	55
Obrázek 5.3-4: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	56
Obrázek 5.3-5: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	57
Obrázek 5.3-6: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	57
Obrázek 5.3-7: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	58
Obrázek 5.3-8: Alternativní 3b zakončení se zdrojem proudu řízeným napětím.....	59
Obrázek 5.4-1: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	60
Obrázek 5.4-2: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$ – detailní pohled na proudy do 150 mA.....	61
Obrázek 5.4-3: Závislost fází proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$	61
Obrázek 5.4-4: Průběhy absolutních hodnot proudů středy všech transformátorů a tlumivek v NKO při havarijním stavu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$. První číslo v názvu tlumivky značí pořadí zleva úseku E KU3 ve kterém se nachází, druhé číslo značí pořadí zleva tlumivky v daném úseku.	62
Obrázek 5.5-1: Závislost amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v 1. informačním bodě na délce analyzovaného obvodu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	63
Obrázek 5.5-2: Závislost amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v hlavním bodě na délce analyzovaného obvodu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	64
Obrázek 5.5-3: Závislost amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v 2. informačním bodě na délce analyzovaného obvodu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	64
Obrázek 5.5-4: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	65
Obrázek 5.5-5: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	66
Obrázek 5.5-6: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	66
Obrázek 5.5-7: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	67
Obrázek 5.5-8: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	68
Obrázek 5.5-9: Závislost maxima amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$ a 0Ω – detail na proudy menší než 150 mA.....	69
Obrázek 5.5-10: Závislost fází proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$	69



- Obrázek 5.6-1: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0 S, R_i = 0 \Omega$ 70
- Obrázek 5.6-2: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0 S, R_i = 0 \Omega$ a $Y_{kk} = 0,4 S$ (odpovídá původnímu svodu skrz pražce), $R_i = 0 \Omega$ 71
- Obrázek 5.6-3: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0 S, R_i = 0 \Omega$ a $Y_{kk} = 0,4 S$ (odpovídá původnímu svodu skrz pražce), $R_i = 0 \Omega$ – zobrazeny jsou proudy menší než 0,15 A.....71
- Obrázek 5.6-4: Závislost fází proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0 S, R_i = 0 \Omega$72
- Obrázek 5.7-1: Schéma čtyřbodového zakončení obvodu pro analýzu havarijního stavu s uvažováním lana73
- Obrázek 5.7-2: Průběhy proudů středy transformátorů DT 0,75 v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze lomu kolejnice pro $f = 75 \text{ Hz}, Y_p = 0,5 S$, se zemním lanem Cu 50 mm²...74
- Obrázek 5.7-3: Průběhy proudů středy transformátorů DT 0,75 v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze lomu kolejnice pro $f = 75 \text{ Hz}, Y_p = 0,5 S$, se zemním lanem Cu 50 mm²-detail na nízké hodnoty proudů do 0,13 A74
- Obrázek 5.7-4: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro model s lanem a původní model bez lana $R_i = 0 \Omega$ 75
- Obrázek 5.7-5: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro model s lanem a původní model bez lana $R_i = 0 \Omega$ – detail na proudy menší než 0,15 A.....75
- Obrázek 5.7-6: Průběhy proudů v závislosti na poloze lomu kolejnice pro tři varianty analýzy s uvažováním lana. Vyneseno je maximum ze tří snímaných proudů pro každou polohu lomu kolejnice. Modře je původní varianta, červeně je varianta s menší podélnou impedancí lana, a zeleně je varianta, která neuvažuje svody přidané v tomto modelu.....76
- Obrázek 5.7-7: Průběhy proudů v závislosti na poloze lomu kolejnice pro tři varianty analýzy s uvažováním lana – detail na proudy menší než 0,14 A. Vyneseno je maximum ze tří snímaných proudů pro každou polohu lomu kolejnice. Modře je původní varianta, červeně je varianta s menší podélnou impedancí lana, a zeleně je varianta, která neuvažuje svody přidané v tomto modelu.77
- Obrázek 7.1-1: Model kolejového obvodu pro první část analýzy průjezdu vlaku80
- Obrázek 7.1-2: Model kolejového obvodu pro druhou část analýzy průjezdu vlaku81
- Obrázek 7.1-3: Model kolejového obvodu pro třetí část analýzy průjezdu vlaku82
- Obrázek 7.3-1: Průběh proudu v IB v závislosti na poloze středu vlaku x pro 50 kHz, napětové napájení, nové parametry transformátorů, tlumivek a svršku, a výchozí šuntovou impedanci.85
- Obrázek 7.3-2: Průběhy napětí v IB a ve snímacích bodech 0,5 a 1 m nalevo a napravo od něj. U_{ib} značí napětí v informačním bodě, ostatní body jsou značeny U_{xy}, kde x značí umístění snímacího bodu nalevo (l) nebo napravo (p), a y značí vzdálenost snímacího bodu od IB v metrech.86
- Obrázek 7.3-3: Rozdíly mezi napětími ve snímacích místech 1 m nalevo a napravo od IB pro různé hodnoty impedancí šuntu, číslo má význam násobku výchozí impedance.86
- Obrázek 7.4-1: Závislost napětí v IB na poloze vlaku pro 10, 20, 30 a 50 kHz, pro Z_{s1}. Napětí byla normalizována.88



Obrázek 7.4-2: Průběhy napětí v IB a ve snímacích bodech 0,5 a 1 m nalevo a napravo IB pro průjezd laku na 20 kHz, Zs1. Napětí je normalizované. Zvýrazněna je hladina napětí, která rozlišuje stav, kdy je vlak blízko IB. Uib značí napětí v informačním bodě, ostatní body jsou značeny Uxy, kde x značí umístění snímacího bodu nalevo (l) nebo napravo (p), a y značí vzdálenost snímacího bodu od IB v metrech.....	89
Obrázek 7.4-3: Závislost napětí v IB na poloze vlaku pro 20 kHz, výchozí (Zs1), poloviční (Zs05) a dvojnásobnou (Zs2) impedanci šuntu. Napětí jsou normovaná k maximální hodnotě napětí pro výchozí impedanci šuntu. Rozsahy os jsou zvoleny tak, aby zachytily průběh napětí v oblasti, kdy je vlak v blízkosti IB (kolem $x=0$), a zároveň nejmenší hodnoty napětí, když byl vlak mimo IB (kolem $x=250$) Modrá křivka je totožná s červenou křivkou z Obrázek 7.4-1).	90
Obrázek 7.5-1: Závislost veličiny A na poloze středu vlaku pro 20 kHz, pro tři různé impedance šuntu (pozn. průběh Zs1 se nachází přibližně uprostřed mezi Zs0,5 a Zs2).	91
Obrázek 10.1-1: Závislost amplitudy napětí v informačních bodech na poloze šuntu.....	95
Obrázek 10.1-2: Závislost fáze napětí v informačních bodech na poloze šuntu.....	96
Obrázek 10.1-3: Závislost amplitudy napětí v hlavním bodě na poloze šuntu.....	96
Obrázek 10.1-4: Závislost fáze napětí v hlavním bodě na poloze šuntu.....	97
Obrázek 10.1-5: Závislost amplitudy proudu v informačních bodech na poloze šuntu.....	97
Obrázek 10.1-6: Závislost fáze proudu v informačních bodech na poloze šuntu.....	98
Obrázek 10.1-7: Závislost amplitudy proudu v hlavním bodě na poloze šuntu.....	98
Obrázek 10.1-8: Závislost fáze proudu v hlavním bodě na poloze šuntu.....	99
Obrázek 10.2-1: Amplitudy napětí v informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu.....	99
Obrázek 10.2-2: Amplituda napětí v hlavním bodě v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu.....	100
Obrázek 10.2-3: Fáze napětí v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu.....	100
Obrázek 10.2-4: Amplitudy proudů v informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu.....	101
Obrázek 10.2-5: Amplituda proudu v hlavním bodě v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu.....	101
Obrázek 10.2-6: Fáze proudů v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu.....	102
Obrázek 10.3-1: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m (vlevo) a 80 m (vpravo), šuntová impedance odpovídá změřené hodnotě.....	103
Obrázek 10.3-2: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 300 m, šuntová impedance odpovídá změřené hodnotě (vlevo), průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m, šuntová impedance odpovídá desetině změřené hodnoty (vpravo).....	104
Obrázek 10.3-3: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 80 m (vlevo) a 300 m (vpravo), šuntová impedance odpovídá desetině změřené hodnoty.....	105
Obrázek 10.3-4: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m (vlevo) a 80 m (vpravo), šuntová impedance odpovídá desetinásobku změřené hodnoty.....	106



- Obrázek 10.3-5: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 300 m, šuntová impedance odpovídá desetinásobku změřené hodnoty (vlevo). Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m, šuntová impedance v levé polovině vlaku odpovídá desetinásobku změřené hodnoty, a v pravé polovině desetině změřené hodnoty (vpravo).107
- Obrázek 10.3-6: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 80 m (vlevo) a 300 m (vpravo), šuntová impedance v levé polovině vlaku odpovídá desetinásobku změřené hodnoty, a v pravé polovině desetině změřené hodnoty.108
- Obrázek 10.4-1: Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 80 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m109
- Obrázek 10.4-2: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 80 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.....110
- Obrázek 10.4-3: Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 24 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m110
- Obrázek 10.4-4: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 24 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.....111
- Obrázek 10.4-5 Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro osamocený šunt, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m.....111
- Obrázek 10.4-6: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro osamocený šunt, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.....112
- Obrázek 10.4-7: Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 20 m, se vzdáleností mezi šunty 2, 16 a 2 m, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m112
- Obrázek 10.4-8: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 24 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.....113



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4.3-1: Použité měřicí přístroje a přípravky.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 4.3-2: Měření přístroje</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 4.3-3: Změřené parametry tlumivky SYT a jejich srovnání s předchozími měřeními [24].....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 4.3-4: Změřené parametry transformátoru DT 0,75 a jejich srovnání s předchozími měřeními (parametry jsou přepočtené na stranu vyššího napětí, převod 42) [25, 22].....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 4.4-1: Parametry transformátoru DT, tlumivky SYT, podélné impedance a impedance šuntu pro frekvence 10, 20 a 30 kHz.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 5.1-1: Výsledky analýzy volného stavu pro $Y_p = 0,5 S$ [9]</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 5.3-1: Proudů středy vinutí transformátorů pro $l = 24 km$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 5.3-2: Výsledné odpory a indukce mezi kolejnicemi a zemí pro $l = 27 km$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 5.3-3: Hodnoty trojpólového zakončení NKO obrazovou impedancí pro $l = 27 km$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 5.3-4: Porovnání výsledků analýzy VS s dvoubodovým a třibodovým zakončením pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 5.5-1: Výsledné hodnoty proudů středy transformátorů DT075 pro ověření konvergence proudů při prodlužování analyzovaného obvodu pro $l = 21 km$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 5.5-2: Výsledná rezistence a reaktance mezi kolejnicemi a mezi kolejnicemi a zemí pro délku KO 21 km.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 5.5-3: Hodnoty trojpólového zakončení NKO obrazovou impedancí pro $l = 21 km$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 5.5-4: Porovnání výsledků analýzy VS s dvoubodovým a třibodovým zakončením pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 6.1-1: Srovnání výsledků analýzy volného stavu s dvojbranovým modelem a analýzy doc. Hospodky [9]</i>	<i>78</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

KO	Kolejový obvod
NKO	Neohraničený kolejový obvod
DT 0,75, DT	Stykový transformátor
SYT	Symetrizační tlumivka
f	Frekvence
EKU	Elektrický kolejový úsek
vrt	Vysokorychlostní trať
LVZ	Liniový vlakový zabezpečovač
ČSD	Československé dráhy
Z_l	Podélná impedance kolejového vedení
Y_p	Příčná admitance kolejového vedení
γ	Činitel šíření vedení
Z_0	Vlnová impedance vedení
PraCAN	Prague Circuit Analyzer (Pražský analyzátor obvodů) – knihovna pro aplikaci Maple
y_{kz}	Vodivost mezi kolejí a zemí
y_{kk}	Vodivost mezi kolejnicemi
l	Délka úseku
Z_{DT}	Impedance transformátoru DT075 naprázdno
Z_{HB}	Ekvivalentní impedance nekonečné koleje s výstrojí, měřená od hlavního bodu
HB	Hlavní bod
IB	Informační bod
ω_{KO}	Úhlový kmitočet, na kterém je kolejový obvod provozován
HS	Havarijní stav
VS	Volný stav
ŠS	Šuntový stav
R_l	Sériová rezistence lana ($\Omega \cdot km^{-1}$)
L_l	Sériová indukčnost lana ($H \cdot km^{-1}$)
R_{kz}	Rezistence mezi prostorem svršku a vzdáleným prostorem v půdě ($\Omega \cdot km$)
R_{kl}	Rezistence mezi prostorem svršku a zemním lanem ($\Omega \cdot km$)
R_{lz}	Rezistence mezi zemním lanem a vzdáleným prostorem v půdě ($\Omega \cdot km$)
k_{AC}	Koeficient vlivu skin efektu na odpor lana
EKU1	Skládá se z EKU o délce 500 m a přilehlé tlumivky SYT



EKU2	Skládá se ze dvou EKU o délce 500 m (celkem 1000 m), mezi kterými se nachází tlumivka SYT
EKU3	Skládá se ze tří EKU o délce 500 m (celkem 1500 m), mezi kterými se nachází dvě tlumivky SYT (jedna mezi prvním a druhým, druhá mezi druhým a třetím úsekem)
EU	Evropská unie



ÚVOD

S rozvojem vysokorychlostních tratí (vrt) ve světě a možná brzy i v České Republice je nutné řešit otázku zabezpečení provozu na těchto tratích. Protože vrt používají v celé délce trati svařované kolejnicové styky, není možné na nich používat tradiční kolejové obvody (KO) s izolovanými styky.

Neohraničené kolejové obvody, které tyto izolované styky nemají, jsou již vyvinuty a nasazeny na železnici například v Německu nebo ve Francii. Tyto obvody ale pracují na vysokých frekvencích, což s sebou nese nevýhody jako je absence fritovacího napětí, omezená délka kolejových obvodů, případně nutnost používání kondenzátorů na každých 100 m trati (a jejich pravidelná kontrola). Alternativou ke kolejovým obvodům je zabezpečení na základě počítačů náprav. Tyto počítače z principu své funkce izolované styky nepotřebují, mají ale své vlastní nevýhody, jako je absence detekce lomu kolejnice a obtížné obnovení provozu po výpadku systému [1].

V této situaci se společnost AŽD Praha, s.r.o. rozhodla vyvinout vlastní typ nízkofrekvenčních neohraničených kolejových obvodů, který nebude mít nedostatky ani jednoho z konkurenčních systémů. Nový KO je založen na práci prof. Poupěte, který ho vyvinul v 80. letech minulého století. Je teď znovu vyvíjen ve spolupráci s odborníky z Fakulty dopravní a Fakulty elektrotechnické ČVUT, jedním z nich je vedoucí této práce.

Analýza kolejových obvodů byla historicky velice náročnou disciplínou. Pokroky ve výpočetní technice však umožnily řešení stovek a tisíců komplexních elektrických obvodů na běžných osobních počítačích v rámci hodin. To umožňuje provést podrobné analýzy kolejového obvodu ve volném šuntovém a havarijním stavu a porovnávat tyto analýzy v závislosti na libovolných parametrech (zpravidla kvalita šuntu nebo svod mezi kolejnicemi). Navíc je poprvé praktické provádět analýzy průjezdu celého vlaku s množstvím šuntujících náprav [2].

Tato práce se zabývá analýzami neohraničeného kolejového obvodu vyvíjeného firmou AŽD Praha, s.r.o. ve volném, šuntovém a havarijním stavu. Práce se opírá o výzkumnou činnost vedoucího práce doc. Hospodky a Ing. Marka. Cílem práce je seznámit se s metodami používanými při analýze kolejových obvodů pomocí aplikace Maple s využitím knihovny PraCAN, dále tyto analýzy rozvine a získá tak nové poznatky ohledně vyvíjeného KO.

V první části se práce zabývá klasifikací kolejových obvodů, jejich modelováním a metodikou při zpracovávání analýz. Dále se zabývá získáním hodnot pro provedení vlastních analýz, ať už je to z dostupných zdrojů nebo vlastním laboratorním měřením. Nakonec jsou provedeny samotné analýzy, a to jak analýzy, které již byly provedeny dříve, tak také analýzy nové, které jsou přínosem autora k vývoji nového typu neohraničených kolejových obvodů.



1 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je seznámit se s možnými způsoby modelování uvažovaného neohraničeného kolejového obvodu (KO) při volném stavu, šuntovém stavu (přes KO projíždí vlak) a havarijním stavu (dojde k lomu kolejnice uvnitř KO). Za tímto účelem autor nejprve nezávisle znovu provede některé analýzy, které již pro daný neohraničený kolejový obvod (NKO) byly provedeny doc. Hospodkou a Ing. Markem. Díky tomu si autor bude moci ze začátku všechny výsledky ověřovat, a dospět tak k modelům prostým chyb. Zároveň tím autor bude do velké míry verifikovat dosavadní práci provedenou na analýzách tohoto typu KO a ověří, že všechny používané modely jsou správné.

V další fázi práce autor vytvoří nové modely a provede analýzy, které jsou čerstvým příspěvkem k objemu teoretických poznatků o tomto novém typu KO. Ve vlastní práci jsou tyto dvě části rozlišeny.

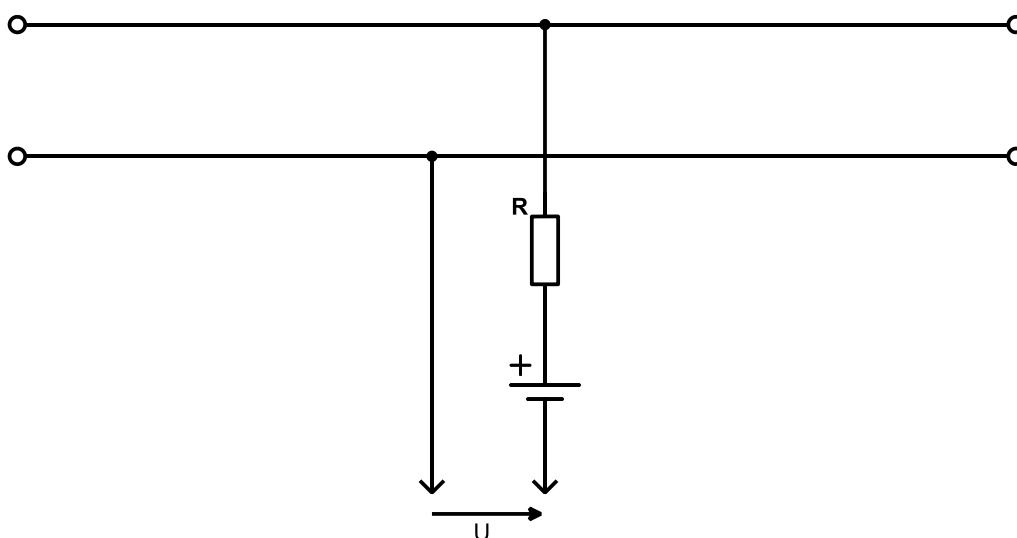
2 KLASIFIKACE KOLEJOVÝCH OBVODŮ

Kolejový obvod (KO) je elektrický obvod, jehož funkcí je detekce přítomnosti kolejových vozidel na určeném úseku koleje. KO se skládá z elektrického kolejového úseku (EKU), zdroje energie a kolejového přijímače. EKU lze považovat za elektrické vedení, jehož vodiče jsou tvořeny kolejnicemi a izolace je tvořena pražci a zbytkem železničního svršku. Všechny KO pracují na principu vodivého propojení kolejnic soukolími kolejového vozidla, takzvaného vlakového šuntu [1].

Stav, kdy se v kolejovém obvodu nachází vlak, se nazývá šuntový stav. Stav, kdy v kolejovém obvodu došlo k přerušení kolejnice, se nazývá havarijní stav. Absence předchozích dvou stavů se nazývá volný stav [2].

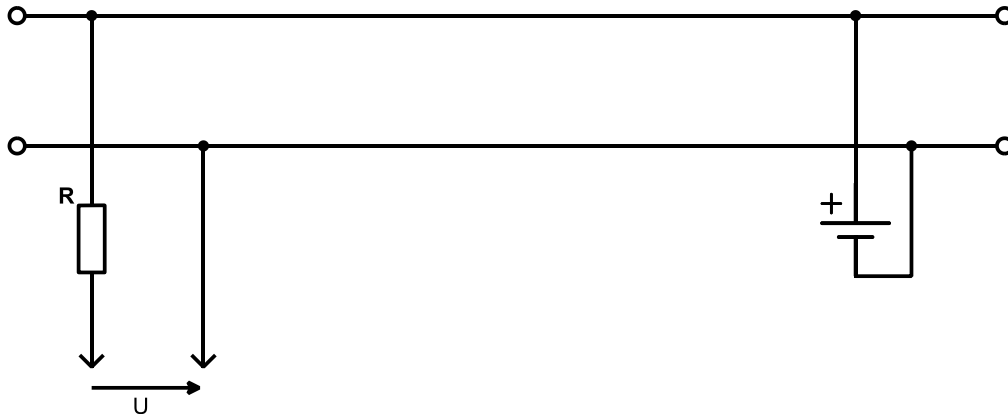
2.1 Sériový a paralelní kolejový obvod

Obrázek 2.1-1 ukazuje elektrické schéma sériového kolejového obvodu. Ve volném stavu spojuje dva póly kolejového přijímače U pouze svod mezi kolejnicemi a obvodem protéká velmi malý proud. Při šuntování kolejového obvodu vlakem proud stoupne a kolejový přijímač detekuje šuntový stav. Protože hlavní části obvodu (zdroj, vlakový šunt a přijímač) jsou v sérii, tento druh kolejového obvodu se nazývá sériový kolejový obvod [1, 3].



Obrázek 2.1-1: Sériový kolejový obvod (překresleno z [1])

Obrázek 2.1-2 ukazuje paralelní kolejový obvod. Ve volném stavu prochází proud ze zdroje vedením do přijímače a ten detekuje volný stav. Při šuntování kolejového obvodu vlakem je zdroj zkratován a do přijímače žádný proud neproteče, kolejový přijímač indikuje šuntový stav. Protože hlavní prvky KO jsou zapojeny paralelně, nazývá se paralelní kolejový obvod [1, 3].



Obrázek 2.1-2: Paralelní kolejový obvod (překresleno z [1])

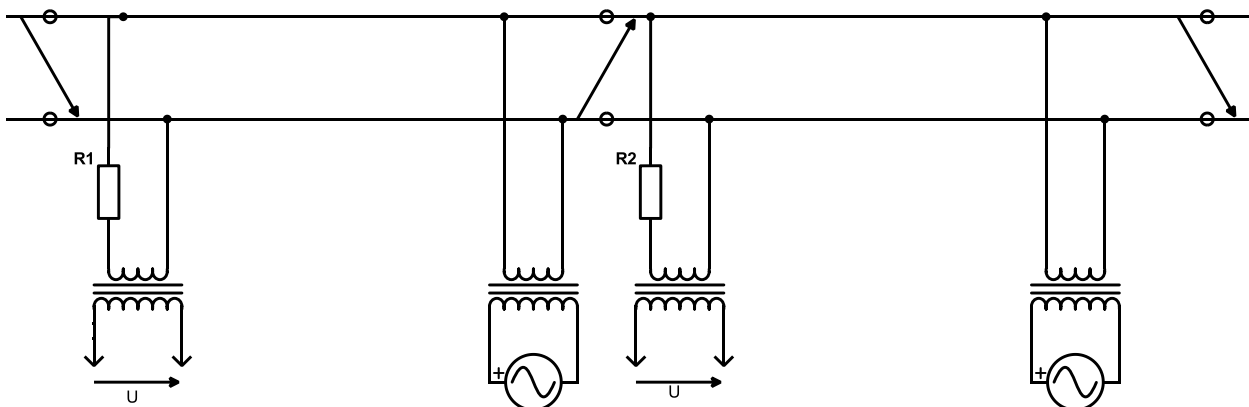
Pro získání bezpečné informace o volnosti koleje musí být kolejový obvod navržen tak, že ani při své poruše nebude obsazenou kolej indikovat jako volnou. Naopak pokud bude kvůli své poruše KO indikovat volnou kolej jako obsazenou, dojde sice ke snížení spolehlivosti provozu, ale budou dodrženy zásady bezpečnosti. V zásadě těmto požadavkům nevyhovuje sériový KO, a paralelní KO jim vyhovuje [1, 3].

Pro získání bezpečné informace o obsazenosti koleje (pro vybavení vlakové cesty nebo anulaci přejezdového zařízení) musí být KO navržen tak, že ani při své poruše nebude volnou kolej indikovat jako obsazenou. V zásadě tomu vyhovuje sériový obvod, paralelní obvod tomuto požadavku nevyhovuje [1, 3].

2.2 Zpětná trakční cesta

Pro použití kolejových obvodů na elektrifikovaných tratích je nutné zajistit účinnou zpětnou cestu trakčního proudu z lokomotivy do napáječky. Z tohoto hlediska se kolejové obvody dělí na jednopásové a dvoupásové [1, 3].

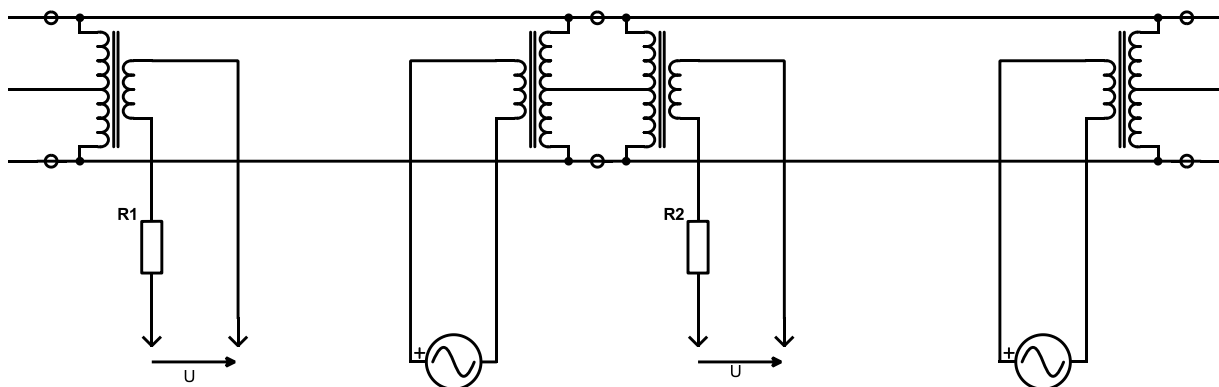
U jednopásových KO je zpětný trakční proud veden pouze jednou kolejí. Z důvodu problému kontroly izolovaných styků ale není veden v celé délce trati tou samou kolejí, protože pak by po selhání jednoho izolovaného styku došlo k vzájemnému ovlivnění sousedních kolejových obvodů. Místo toho je trakční proud veden pomocí kosých propojek střídavě oběma kolejnícemi, jak ukazuje Obrázek 2.2-1. Zde při selhání izolovaného styku dojde ke zkratování jednoho přilehlého KO kosou propojkou a tím k obsazení daného úseku [1, 3].



Obrázek 2.2-1: Jednopásový kolejový obvod (překresleno z [1])

Použitím stykových transformátorů nebo tlumivek lze dosáhnout toho, že trakční proud bude veden oběma kolejnícemi a bude mezi ně rozdělen přibližně rovnoměrně. Stykové transformátory jsou zvyšující transformátory s vyvedeným středem primárního, kolejového vinutí. Střed transformátů na koncích sousedních kolejových obvodů jsou propojeny. Magnetický obvod transformátoru umožní průtok

trakčního proudu do sousedního obvodu a zajistí jeho symetrické rozdělení, a zároveň do sousedního obvodu nepropustí signální proud. Takový dvoupásový kolejový obvod ukazuje Obrázek 2.2-2 [1, 3].



Obrázek 2.2-2: Dvojtrácký kolejový obvod (překresleno z [1])

2.3 Kolejové obvody bez izolovaných styků

Dosavadně diskutované typy kolejových obvodů předpokládaly pro svou funkci existenci izolovaných kolejových styků, které od sebe elektricky oddělovaly sousední kolejové obvody. Izolované styky s sebou ale nesou nutnost pravidelné kontroly jejich stavu a omezení maximální rychlosti na tratích, které by jinak mohly být kompletně svařované. S nástupem vysokorychlostních tratí (vrt) je třeba se zabývat kolejovými obvody, které ke své funkci izolované styky nepotřebují [1, 3].

2.3.1 Nízkofrekvenční kolejové obvody

Základní druh neohrazených kolejových obvodů se skládá ze zdroje uprostřed a přijímačů na okrajích kolejového obvodu. Sousední kolejové obvody pracují na jiných frekvencích a vzájemně se neovlivňují. Zásadní nevýhodou je, že pokles napětí na přijímači způsobený vlakovým šuntem nastane stovky metrů předtím, než vlak vjede do prostoru mezi přijímačem a zdrojem. Přesné místo navíc záleží na (proměnlivých) parametrech svršku a na (proměnlivé) kvalitě vlakového šuntu, takže nelze přesně určit, kdy vlak do kolejového obvodu vjel. Přesto se tento typ používá na tratích bez návěstidel, ovládaných například pouze přes liniový vlakový zabezpečovač (LVZ) [1].

Jistým vylepšením tohoto obvodu jsou obvody se zkratovým ohraničením a proudovým snímáním. Při vhodné volbě impedance zkratovací propojky na okrajích KO přítomnost vlaku vně KO nebude detekována. Problémem je, že vlak nemusí být detekován ani v určité vzdálenosti od zkratovací propojky směrem dovnitř KO, která je opět závislá na parametrech šuntu a svršku. Další vlak vně KO navíc svým šuntem může dále tuto vzdálenost prodloužit [1].

Velice kreativně k řešení problému neohrazených kolejových obvodů přistoupil prof. Poupě, který je autorem hned dvou typů kolejových obvodů, které byly v 80. letech oba provozovány ve zkušebním provozu u ČSD [1].

Prvním je tzv. translační kolejový obvod. Jeho funkce spočívá v rozdělení KO na několik úseků. Přijímač a vysílač (s funkcí dodatečného kódování LVZ) se pak postupně přepínají vždy do úseku, ve kterém se vlak nachází. Po tom, co vlak projede posledním úsekem a přejede do sousedního KO, se provede kontrola volnosti KO. Poté je KO připraven a projetí dalšího vlaku. Detailnější popis funkce KO nabízí Chudáček [1].

Druhým typem je nárazníkový kolejový obvod. Schéma vychází ze základního schématu neohrazeného KO, ale na koncích obvodu jsou místo přijímačů umístěny nárazníkové zdroje, které jsou slabší než zdroj hlavní uprostřed obvodu. Hned u nárazníkových zdrojů jsou umístěny indukční snímače kolejnicového proudu. Fázově citlivý přijímač vyhodnocuje fázi proudu protékajícího kolejnicemi. Ve



volném stavu v kolejnicích převládá proud z hlavního zdroje, ale po vjetí vlaku do obvodu je tento proud šuntován a skrze kolejnice u nárazníků protéká proud z nárazníkových zdrojů. Z tohoto typu KO vychází i NKO modelovaný v rámci této práce [1].

2.3.2 Vysokofrekvenční kolejové obvody

Zatím nejvíce rozpracované (a to zahraničními firmami) jsou kolejové obvody pracující na vysokých frekvencích v řádu kHz. Podélná impedance kolejového vedení roste s frekvencí přibližně lineárně, kolejové vedení tak má větší útlum, a to usnadňuje řešení problému s ohraničeností KO a se vzájemným ovlivňováním KO na jedné trati. Nevýhodou většího útlumu je, že zkracuje maximální délku KO a/nebo znemožňuje dosažení fritovacího napětí 1,1 V [1, 4].

Kolejový obvod typu FTGS od firmy Siemens používá k ohraničení obvodu tzv. elektrické styky. Elektrické styky se skládají z měděné propojky ve tvaru S mezi kolejnicemi a přídavných rezonančních prvků. Vytvářejí soustředěnou podélnou a příčnou impedanci, která slouží k elektrickému oddělení sousedních kolejových obvodů. Výstroj v kolejišti může být od zázemí vzdálena až 6,5 km, signální kmitočet je 4-6 kHz pro tratě a 8-16 kHz pro stanice, délka obvodu pro širokou trať je při napájení ze středu obvodu omezena na 1200 m, nepřesnost určení polohy vlaku na okrajích KO je podle kmitočtu 3,5 až 9,5 m. Maximální svod je 0,67 S/km, šuntová citlivost je až 0,5 Ω [1, 5].

Kolejový obvod UM 71 od francouzské CSEE je ohraničen rezonančními obvody tvořenými dvěma laděnými obvody a vzduchovou mezerou stykového transformátoru ST. Signální kmitočet je 1,7 až 2,6 kHz. Pro snížení útlumu kolejového vedení uvnitř kolejového obvodu je indukčnost vedení kompenzována kondenzátory připojovanými po 100 m. Konstrukční délka KO tak dosahuje až 1500 m při svodu 0,4 S/km. Přesah sousedních KO je opět cca 10 m [1, 6].

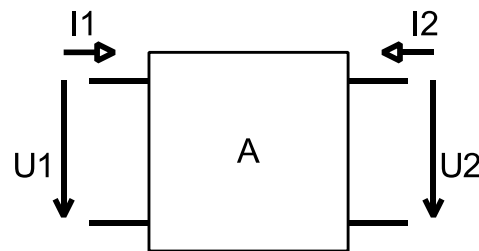
V současné době jsou v prodeji mnohé nové typy NKO, například Siemens nahradil typ FTGS novým typem Clearguard TCM 100 a vyvinul nový typ FS2550 Mk II, který pracuje na principu podobném typu UM 71. Společnost Ansaldo STS nabízí neohraničené kolejové obvody AF-900 a AF-1000. Tímto byly ve stručnosti probrány základní typy kolejových obvodů, a to včetně těch neohraničených [7, 8, 6].

3 MODELOVÁNÍ KOLEJOVÝCH OBVODŮ

Aby bylo možné provést analýzu a případnou syntézu kolejového obvodu, je třeba mít přesný model daného obvodu. Kolejové modely je možné modelovat pomocí dvojbranového modelu, který je výpočetně nenáročný, ale je omezen (jak název napovídá) pouze na dvojbrany. Dále je možné analyzovat KO pomocí řešiče elektrických obvodů, typicky používajícího pokročilou metodu založenou na metodě uzlových napětí. V této metodě jsou všechny prvky obvodu reprezentovány modely složenými z lineárních prvků, tedy rezistencí, indukčností a kapacit, společně se zdroji napětí a/nebo proudu. Vzniká ale problém s modelováním prvků s rozloženými parametry, tedy s modelováním kolejového vedení. Určitým sloučením těchto dvou metod je použití řešiče obvodů s obvodovou reprezentací dvojbranů. Následující podkapitoly se zabývají těmito přístupy [9, 4, 1].

3.1 Dvojbranový model

Při modelování kolejových obvodů se vychází z popisu elektrických kolejových úseků (EKU) jako elektrického vedení. Toto vedení lze popsat jako elektrický dvojbran, jako ukazuje Obrázek 3.1-1, a dvojbranové modely lze s výhodou použít i pro modelování výstroje a jevů v kolejovém obvodu. Těmi jsou stykové transformátory, symetrizační tlumivky, vlakový šunt nebo lom kolejnice [9, 2, 4].



Obrázek 3.1-1: Dvojbran s vyznačenými proudy a napětími (překresleno z [9])

Za předpokladu, že kolejový úsek se chová jako lineární obvod, vzájemné vztahy napětí a proudů u dvojbranu na obrázku pak mohou být popsány pomocí matic [9, 1, 4]:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Pro popis kolejového vedení pomocí dvojbranu je třeba znát parametry tohoto vedení [9, 1, 4]:

- Z_l je podélná impedance
- Y_p je příčná admitance

Pro vedení konečné délky l lze pro vstupní napětí a proud psát [9, 1, 4]:

$$U_1 = U_2 \cosh \gamma l - I_2 Z_0 \sinh \gamma l \quad (V) \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_0} \sinh \gamma l - I_2 \cosh \gamma l \quad (A) \quad (3)$$

Kde $\gamma = \sqrt{Z_l Y_p}$ (m^{-1}) je činitel šíření.

$Z_0 = \sqrt{\frac{Z_l}{Y_p}}$ (Ω) je vlnová impedance.

Z rovnic (2) a (3) je zřejmé, jakou vazbu mají parametry A dvojbranu na parametry γ a Z_0 vedení [9]:

$$A_{11} = \cosh \gamma l, A_{12} = Z_0 \sinh \gamma l \quad (4)$$



$$A_{21} = \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l, A_{22} \cosh \gamma l \quad (5)$$

Pokud je kolejový obvod řešen pomocí těchto dvojbranů, jsou dvojbrany příslušné prvkům v kolejovém obvodu zřetězeny za sebe. Pak lze řešení daného obvodu získat vynásobením všech zřetězených matic a následným vyřešením výsledné (kaskádní) matice [9, 1, 4].

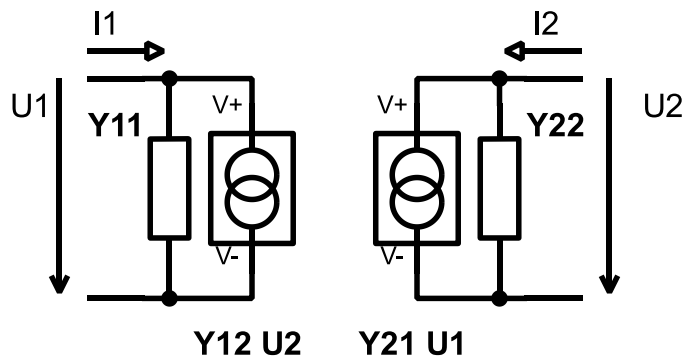
3.2 Obvodový model

V této práci je k modelování kolejových obvodů využito knihovny Prague Circuit Analyzer (PraCAN) pro matematickou počítačovou aplikaci Maple od firmy Waterloo Maple Inc. S pomocí knihovny PraCAN je snadné realizovat modely transformátorů, tlumivek a vlakového šuntu a tyto modely jsou popsány v kapitole 5.1 [10, 11].

Problém nastává u analýzy kolejového vedení s rozprostřenými parametry. To je možné modelovat pomocí článkového modelu, tedy řetězením Π , Γ nebo T článků. Počet článků pak určuje přesnost modelu. Nevýhodou tohoto modelu však je, že aby byl stejně přesný jako dvojbranový popis, musel by počet článků být nekonečný. Při přijetí jisté chyby výpočtu je ale možné použít tak nízký počet článků, aby byl výpočet prakticky realizovatelný. Tento popis je však výhodný tam, kde dvojbranový popis nelze použít, a to u analýz havarijního stavu, kde je potřeba vzít v úvahu na napětí a proudy působící na dvojbran podélně. Tvorbou článkového modelu pro havarijní stav se zabývá kapitola 3.9 [9].

3.3 Obvodový model s dvojbranou

Možností, jak použít obvodový model pro analýzu šuntového stavu a zároveň nepřijít o výhody dvojbranů, je využití některé z obvodových reprezentací dvojbranového modelu. Takovou reprezentací je admitanční model, který ukazuje Obrázek 3.3-1.



Obrázek 3.3-1: Admitanční model dvojbranu (překresleno z [9]).

Vztahy na obrázku reprezentuje tato maticová rovnice [9]:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

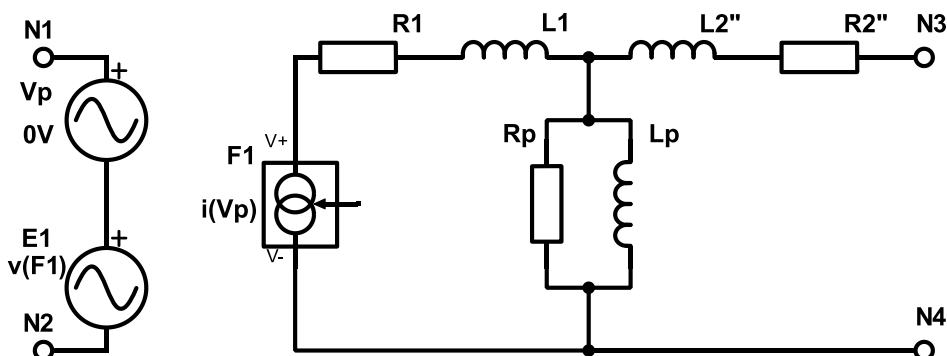
Vztahy pro přepočítání mezi A a Y maticemi jsou pak [9]:

$$Y_{11} = \frac{A_{22}}{A_{12}}, Y_{12} = -\frac{|A|}{A_{12}}, Y_{21} = -\frac{1}{A_{12}}, Y_{22} = \frac{A_{11}}{A_{12}} \quad (7)$$

Tento model kolejového vedení je však platný pouze pro případy, kdy na dvojbran není přiloženo žádné podélné napětí. Je tedy vhodný k modelování volného a šuntového stavu KO, naopak k modelování havarijního stavu KO je nevhodný [9].

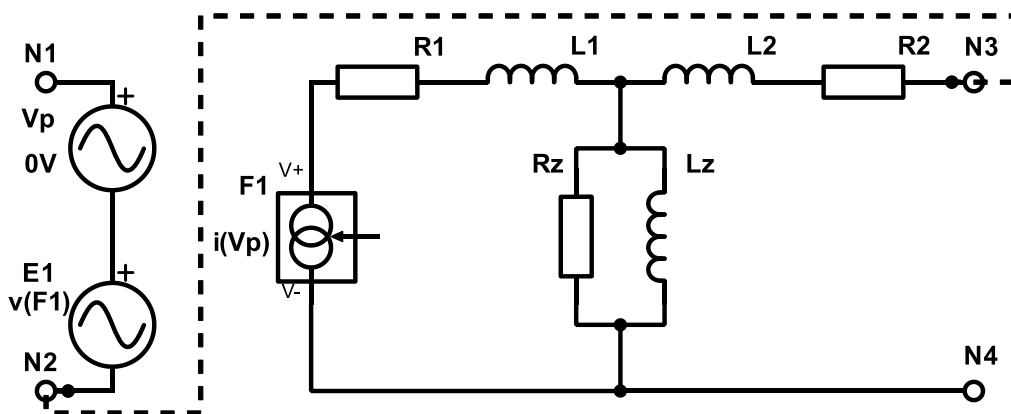
3.4 Model transformátoru DT 0,75 a tlumivky SYT

Pro provedení jakýchkoli analýz je třeba zejména vytvořit obvodový model kolejového obvodu, který bude možné řešit pomocí knihovny PraCAN. Zkoumaný kolejový obvod obsahuje symetrizační tlumivky (SYT) a stykové transformátory (DT 0,75), které mají vyvedený střed vinutí. Obrázek 3.4-1 ukazuje náhradní model transformátoru. Ten umožňuje modelovat stykové transformátory pro účely volného a šuntového stavu, protože v těchto stavech jsou kolejnice napájeny symetricky, a středem vinutí neteče žádný proud. Proto pro tyto dva stavy KO středová vinutí neuvažujeme.



Obrázek 3.4-1: Model transformátoru

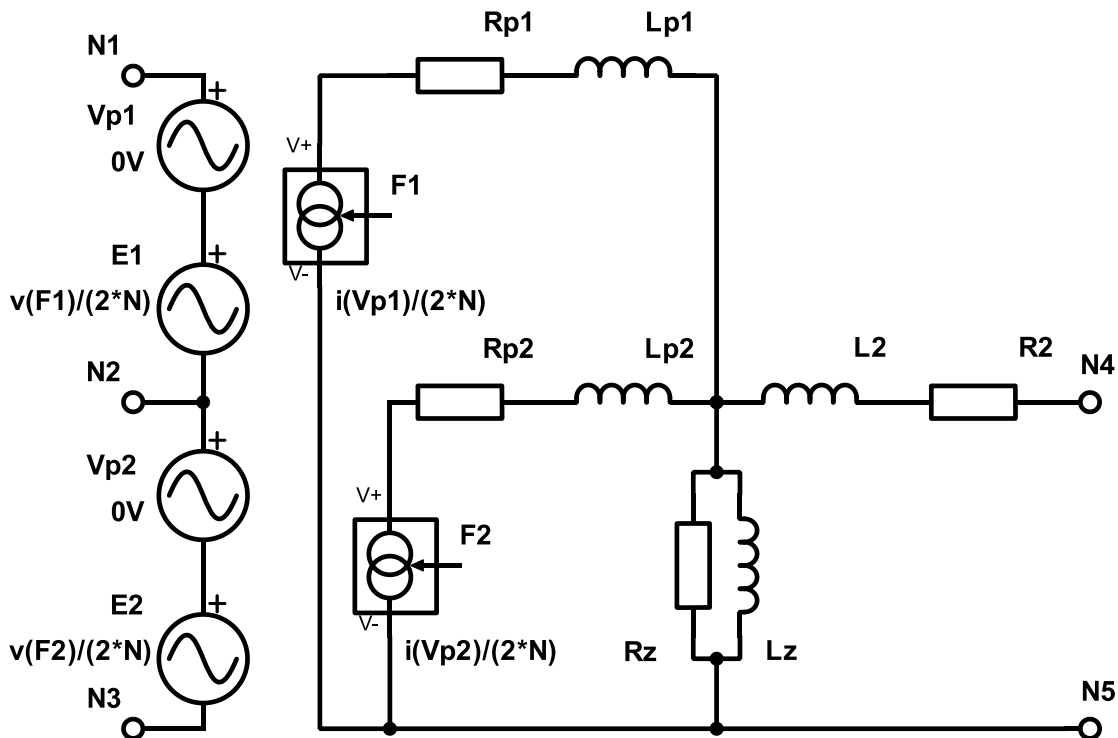
Model symetrizační tlumivky s vyvedeným středem (SYT) ukazuje Obrázek 3.4-2. SYT je modelovaná jako transformátor, přičemž uzly N2 a N3 jsou v obvodu spojeny (na obrázku naznačeno přerušovanou čarou). Každá polovina tlumivky je pak uvažována jako jedno vinutí transformátoru, přičemž obě vinutí mají stejné parametry a převod tohoto „transformátoru“ je $N = 1$. Uzly N1 a N4 jsou pak připojeny k jedné a k druhé kolejnici, spojené uzly N2 a N3 představují vyvedený střed tlumivky, který je uzemněn [9, 12, 13].



Obrázek 3.4-2: Model tlumivky SYT jako transformátoru (nakresleno dle [9, 12])

Pro účely volného a šuntového stavu sice středový vývod nepotřebujeme, ale toto je jeden z nejjednodušších způsobů, jak modelovat tlumivku SYT pomocí parametrů transformátoru, které stejně musí být změřeny pro havarijný stav. V konečných analýzách se stejně tento model nevyskytuje, jak bude vysvětleno níže.

Na rozdíl od analýz VS a ŠS není při analýze havarijního stavu (HS) možné zanedbat středový vývod u kolejového vinutí stykových transformátorů. Model transformátoru s vyvedeným středem primárního vinutí (DT075) uvádí Obrázek 3.4-3. Transformátor je modelován jako transformátor se dvěma primárními vinutími, a tato vinutí jsou zapojena do série, čímž tvoří primární vinutí s vyvedeným středem. Uzly N1 a N3 se připojují ke kolejnicím, uzly N4 a N5 k napájecímu zdroji a uzel N2 je vyvedený střed, který se uzemňuje [12].



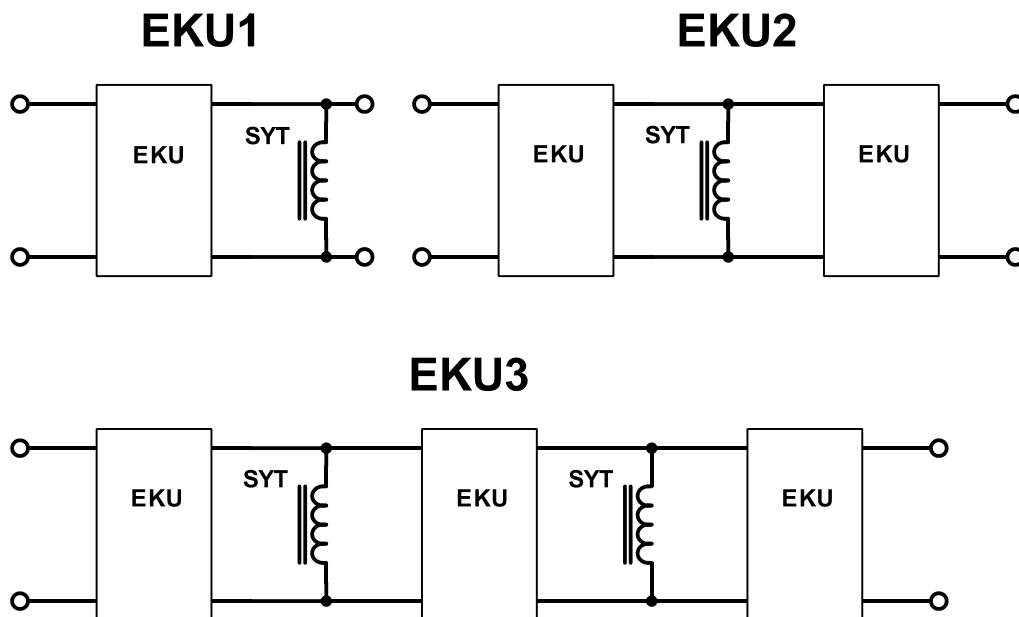
Obrázek 3.4-3: Model transformátoru DT075 (nakresleno dle [12])

3.5 Model elektrického kolejového úseku

Pro analýzu volného a šuntového stavu může být dvojice kolejnic považována za vedení. Jednotlivé úseky vedení lze popsat dvojbranem, který lze pro účely knihovny PraCAN modelovat pomocí obvodových prvků. Tento dvojbran může reprezentovat elektrický kolejový úsek (EKU), jak popisují přechodí kapitoly 3.1 a 3.3. Také může popisovat i úsek koleje, která je vybavená výstrojí, což jsou v případě NKO symetrizační tlumivky SYT. Za tímto účelem byly vypočteny parametry dvojbranu pro úseky EKU1, EKU2 a EKU3 [9, 12]:

- EKU1 sestává z EKU o délce 500 m a přilehlé tlumivky SYT
- EKU2 sestává ze dvou EKU o délce 500 m (celkem 1000 m), mezi kterými se nachází tlumivka SYT
- EKU3 sestává ze tří EKU o délce 500 m (celkem 1500 m), mezi kterými se nachází dvě tlumivky SYT (jedna mezi prvním a druhým, druhá mezi druhým a třetím úsekem)

Schémata těchto modelů ukazuje Obrázek 3.5-1 [12].

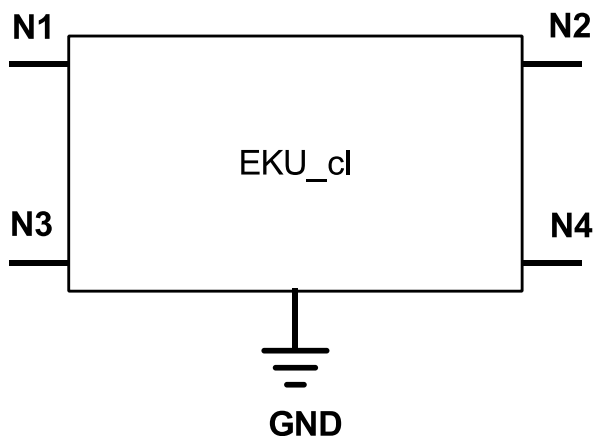


Obrázek 3.5-1: Schémata ECU1, ECU2, ECU3 (překresleno z [12])

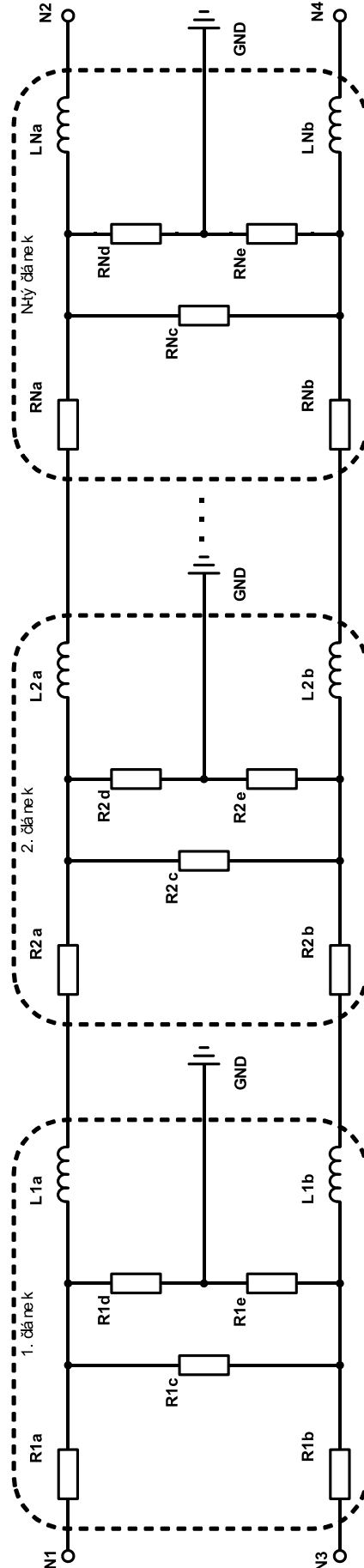
Pro obvodový model dvojbranu je třeba znát pouze jeho impedanci naprázdno a nakrátko při buzení do vstupní, respektive výstupní brány. Ke zjištění těchto parametrů stačí dvě elementární analýzy jednoduchých obvodů (Obrázek 3.5-1) pomocí knihovny PraCAN. Modely ECU1, ECU 2 a ECU3 mohou výrazně zjednodušit analyzovaný obvod a tím pak podstatně ušetřit výpočetní čas při řešení samotného šuntového stavu [12].

Na rozdíl od analýz VS a ŠS není při analýze havarijního stavu (HS) možné zanedbat svod z kolejnic do země, ani středový vývod u kolejového vinutí stykových transformátorů. Proto není možné modelovat kolejový úsek jako vedení popsané dvojbranem, ale je třeba vytvořit obvodový model z prvků se soustředěnými parametry.

Podobvod má pět externích uzlů, jak ukazuje Obrázek 3.5-2. Uzly N1 – N4 představují koleje na okraji ECU, uzel GND představuje zem, na kterou jsou připojeny všechny svody uvnitř modelu. Obrázek 3.5-3 ukazuje vnitřní strukturu článkového modelu ECU [9].



Obrázek 3.5-2: Schéma podobvodu ECU_cl (nakresleno dle [9])



Obrázek 3.5-3: Vnitřní struktura článkového modelu ECU (nakresleno dle [9])



Z [4] byla převzata měrná podélná impedance a měrná příčná vodivost. Dále byl z [4] převzat parametr p , který upravuje poměr svodu mezi kolejnicemi a svodu mezi kolejnicí a zemí, a to podle vztahu [4]:

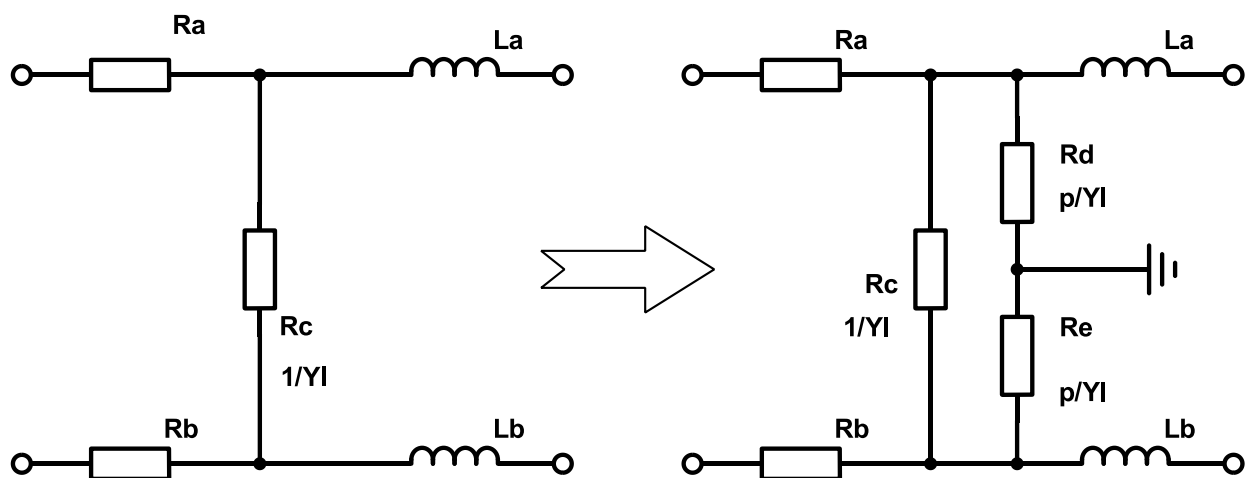
$$y_{kz} = y_{kk} * p \quad (8)$$

Kde y_{kz} je vodivost mezi kolejnicí a zemí
 y_{kk} je vodivost mezi kolejnicemi

Z podélné impedance Z_l jsou snadno odvozeny hodnoty rezistencí $R_a = R_b$ a induktancí $L_a = L_b$:

$$R_a = R_b = \frac{Re(Z_l) * l}{2 * N}, L_a = L_b = \frac{Im(Z_l) * l}{2 * N} \quad (9)$$

Kde l je délka modelovaného kolejového úseku
 N je počet článků v jednom kolejovém úseku



Obrázek 3.5-4: Změna modelu při zavedení svodu do země

Problém je v tom, že, jak ukazuje Obrázek 3.5-4, pokud by se do modelu pouze přidaly svody do země R_d a R_e , a svod mezi kolejnicemi R_c zůstal stejný, změnil by se celkový svod mezi kolejnicemi.

Literatura [4] výslovně uvádí, že parametr p vyjadřuje poměr mezi hodnotami prvků v náhradním schématu. Aby byl článek se svodem do země v rámci analýzy volného a šuntového stavu ekvivalentní k článku bez svodů do země, je nutné použít jinou hodnotu rezistence R_c , než by byla použita v původním článku. Proto byly zadané parametry svodu celkového svodu mezi kolejemi Y_l a parametru p zachovány a byly k nim dopočítány nové hodnoty rezistencí R_c , R_d a R_e . Celková rezistence mezi kolejemi R_{kk_celk} se spočte podle Obrázek 3.5-4 (napravo) takto:

$$R_{kk_celk} = R_c || (R_d + R_e) = R_c || (2 * R_d) = \frac{1}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{2 * R_d}} \quad (10)$$

$$R_d = \frac{R_c}{p} \Rightarrow R_{kk_celk} = \frac{1}{\frac{1}{R_c} + \frac{p}{2 * R_c}} \quad (11)$$

$$R_c = R_{kk_celk} \left(1 + \frac{p}{2}\right) \quad (12)$$

3.6 Zakončení neohraničeného obvodu

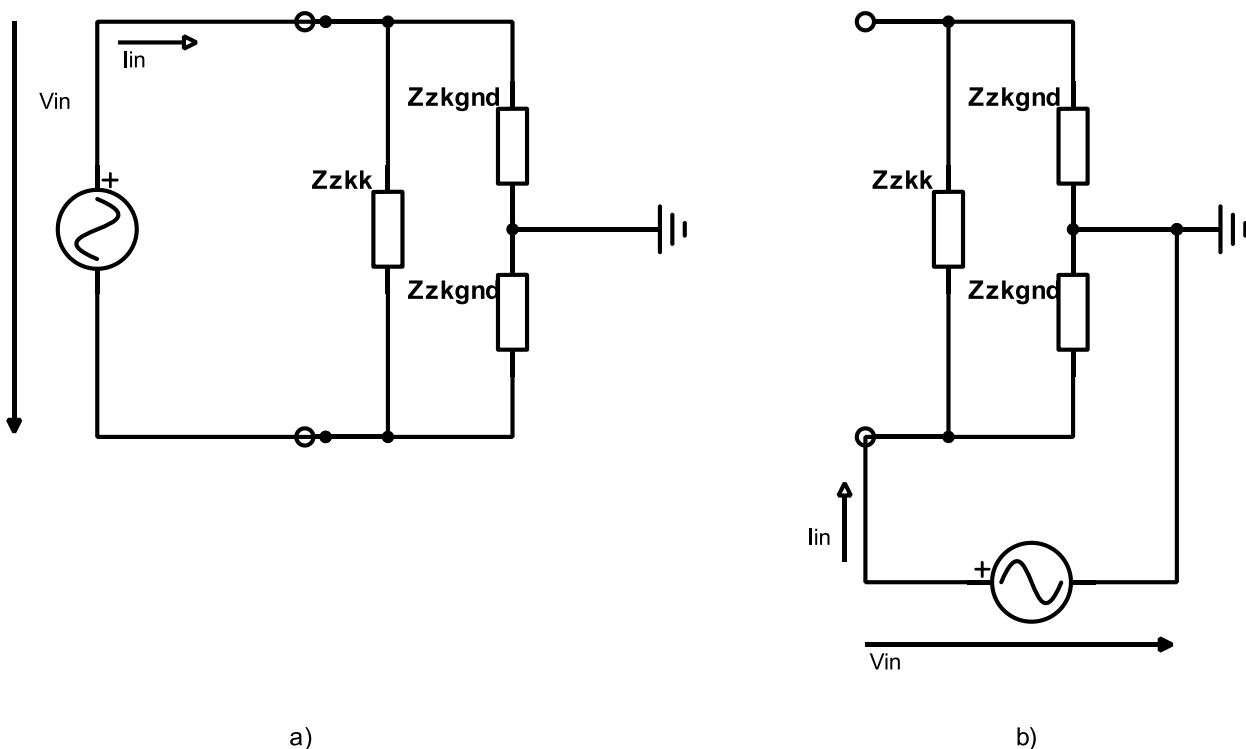
Protože předmětem analýzy je neohraničený kolejový obvod, pro potřeby výpočtu je nutné jej zakončit. Pro analýzy VS a ŠS je obvod zakončen jednoduchou impedancí. Obvod se zakončuje ekvivalentní impedancí nekonečného kolejového úseku vybaveného výstrojí (SYT, DT 0,75 bez zdrojů). Tuto impedanci mezi kolejnicemi získal doc. Hospodka, a způsob jejího výpočtu byl od něj převzat. Spočívá ve zjištění vstupní impedance dostatečně dlouhého úseku koleje s výstrojí. [12].

Pro modelování havarijního stavu, který ukazuje Obrázek 3.9-1, je třeba navrhnout zakončení trojpólem, které respektuje svod do země. Obvod, ze kterého se získávají hodnoty pro třibodové zakončení, sestává ze zdroje napětí, který je připojen buď mezi koleje, nebo mezi jednu kolej a zem. K němu se, příkládají kolejové úseky osazené výstrojí (bez buzení) a zakončené dvoubodovým zakončením převzatým od doc. Hospodky. Délka vloženého kolejového úseku je v každém kroku o 3 km delší. Obvody použité pro tuto analýzu ukazuje Obrázek 3.6-2. Vstupní rezistence a reaktance byly z analýzy zjištěny takto:

$$R_{kk} = \operatorname{Re}\left(\frac{V_1}{I(V_1)}\right), R_{k1gnd} = \operatorname{Re}\left(\frac{V_2}{I(V_2)}\right), R_{k2gnd} = \operatorname{Re}\left(\frac{V_3}{I(V_3)}\right) \quad (13)$$

$$X_{kk} = \operatorname{Im}\left(\frac{V_1}{I(V_1)}\right), X_{k1gnd} = \operatorname{Im}\left(\frac{V_2}{I(V_2)}\right), X_{k2gnd} = \operatorname{Im}\left(\frac{V_3}{I(V_3)}\right) \quad (14)$$

Obrázek 3.6-1 ukazuje schéma zapojení, které ilustruje problém s měřením hodnot třípólového zakončení. Celý pasivní kolejový úsek mohl být nahrazen trojicí impedancí [14].



Obrázek 3.6-1: Schéma zapojení k měření vstupních impedancí kolejového úseku (překresleno z [14])

Jejich hodnoty ale nemohou být získány přímo ze simulace, protože jsou měřeny stejně jako v kapitole 5.3.2 v zapojeních, které uvádí Obrázek 3.6-1 a) a b), pro měření mezi kolejnicemi a mezi kolejnicí a zemí respektive. Při zapojení a) je měřena impedance $Z_{kk} = Z_{zkk} \parallel (2 \cdot Z_{zkgnd})$ a při zapojení b) $Z_{kgnd} = Z_{zkgnd} \parallel (Z_{zkk} + Z_{zkgnd})$ [14].

Tyto soustavu rovnic je možné vyřešit a získat tak hodnoty Z_{zkk} , Z_{zkgnd} . Z těchto pak lze získat hodnoty prvků, které pak budou použity pro třibodové zapojení při simulaci havarijního stavu [14].



$$Z_{kk} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{zkk}} + \frac{1}{2 * Z_{zkgnd}}}, Z_{kgnd} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{zkk} + Z_{zkgnd}} + \frac{1}{Z_{zkgnd}}} \quad (15)$$

$$Z_{zkk} = \frac{\frac{1}{2} Z_{kk} (4 * Z_{kgnd} - Z_{kk})}{-Z_{kk} + 2 * Z_{gnd}}, Z_{zkgnd} = 2 * Z_{kgnd} - \frac{1}{2} Z_{kk} \quad (16)$$

$$R_{zkk} = \frac{1}{\operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z_{zkk}}\right)}, L_{zkk} = \frac{1}{\omega_{KO} \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Z_{zkk}}\right)}, \quad (17)$$

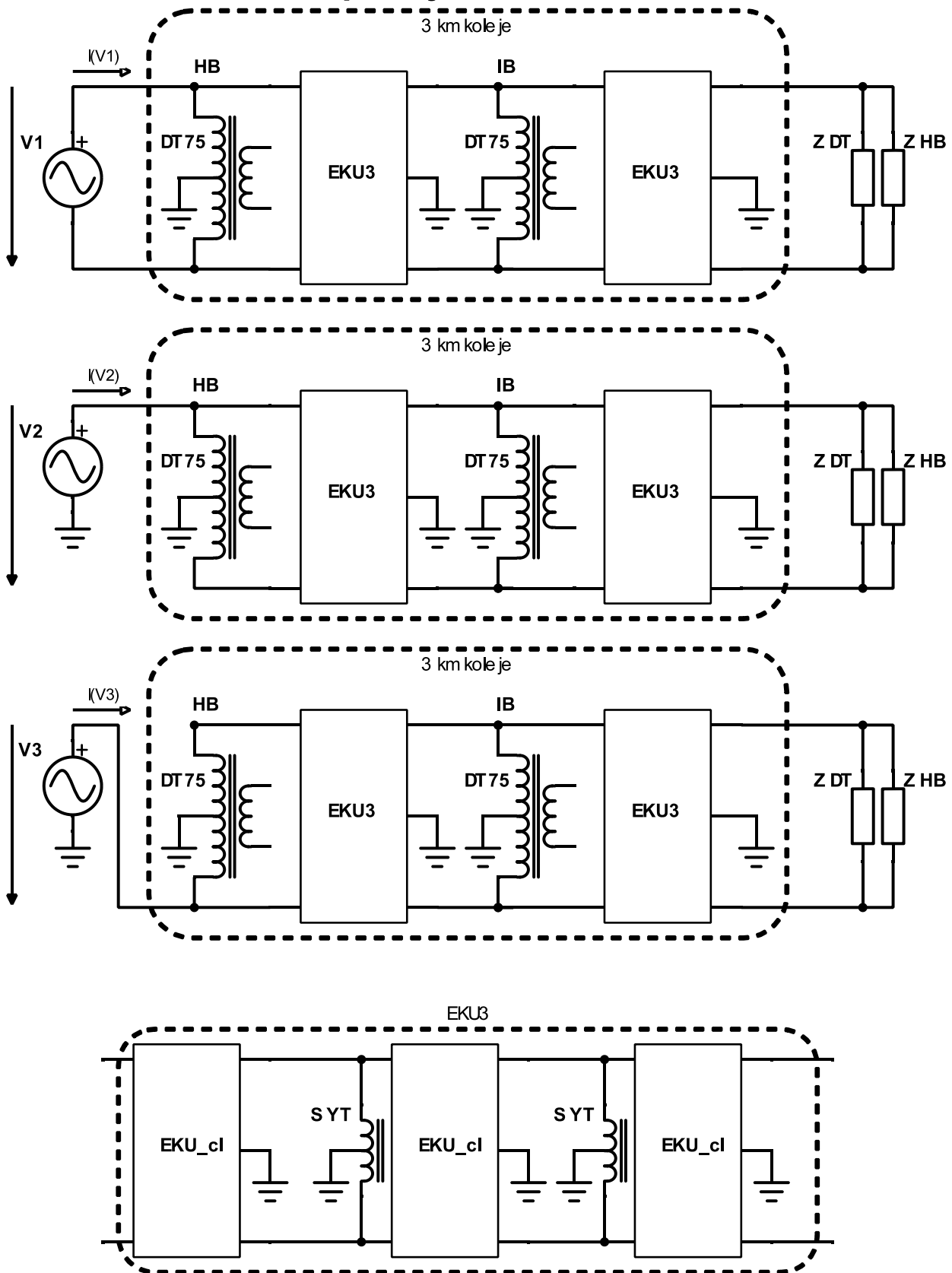
$$R_{zkgnd} = \frac{1}{\operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z_{zkgnd}}\right)}, L_{zkgnd} = \frac{1}{\omega_{KO} \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Z_{zkgnd}}\right)} \quad (18)$$

Kde ω_{KO} je úhlový kmitočet, na kterém je kolejový obvod provozován.

Přepočty impedancí na hodnoty jednotlivých parametrů jsou takové proto, že každá impedance je modelovaná paralelní kombinací rezistence a indukčnosti, ne sériovou. Díky použití paralelní kombinace se sníží počet uzlů v modelu a tím výpočetní náročnost analýzy. Jedná se o duální obvod k častěji použité sériové kombinaci rezistence a indukčnosti [14].



opakuje se N-krát



Obrázek 3.6-2: Zapojení obvodů pro zjištění přibližné vstupní impedance nekonečného kolejového úseku



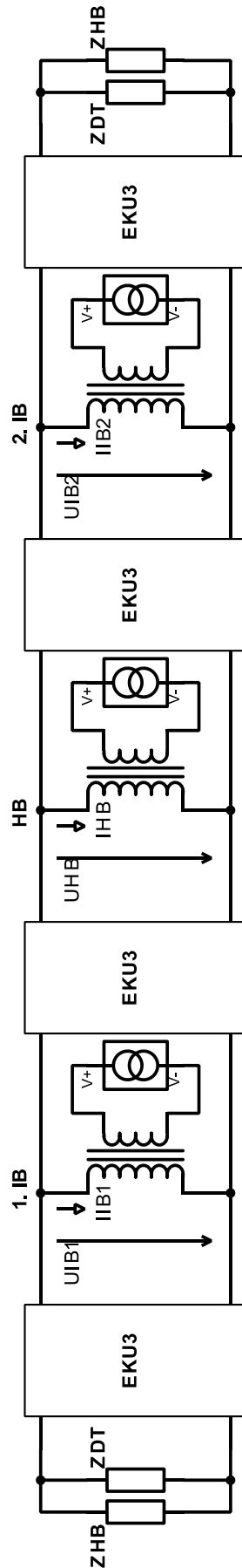
3.7 Modelování volného a šuntového stavu

Z výše popsaných stavebních bloků už může být sestaven obvodový model KO. Pro volný stav (VS) ho ukazuje Obrázek 3.7-1. Místo dvojbranů EKU zapojených se SYT modelovanými jako transformátory byly použity dvojbrany popisující celý úsek EKU3 [12].

Analýza šuntového stavu (ŠS) pak může být provedena prostým vkládáním rezistence šuntu mezi příčné uzly v obvodu. V modelu použitém pro analýzu VS je jich málo, ale jejich počet lze zvýšit tím, že se pro 1,5 km koleje nepoužije jeden dvojbran, ale více dvojbranů. Tímto přístupem ale nelze krok analýzy (vzdálenost mezi jednotlivými šunty) snížit na méně než stovky metrů [12].

Je však jiný přístup, který umožňuje provést skutečně podrobnou analýzu ŠS. Tento přístup vyžaduje analýzu provést po částech, kdy se odděleně semisymbolicky řeší analýzy vždy pro jeden EKU, který se nachází mezi dvěma tlumivkami SYT nebo mezi tlumivkou SYT a transformátorem DT 0,75. Pro analýzu celého NKO je tedy vytvořeno celkem dvanáct netlistů. V každém netlistu je vždy ten EKU, kde se šunt nachází, rozdělen na dva dvojbrany, jejichž parametry jsou závislé na proměnné x značící polohu šuntu. Ostatní EKU pak jsou spojeny do EKU1 až EKU3 tak, aby výsledný netlist obsahoval co nejméně prvků. Každý netlist pak je vyřešen jednou a následně je do výsledků postupně dosazováno za x , aby byly získány výsledky s libovolně jemným krokem analýzy. Celý tento algoritmus lze zpracovat ve formě procedury. [14].

V případě, že je třeba analyzovat VS nebo ŠS s článkovým modelem a s modelováním středních vývodů u výstroje, je postup stejný jako výše, jen jsou použity jiné modely pro jednotlivé prvky (tyto modely jsou popsány níže). Analýza VS a ŠS s těmito modely je neefektivní pro modelování těchto stavů, ale má velký přínos v ověření správnosti poměrně složitých modelů používaných pro HS.



Obrázek 3.7-1: Model NKO pro analýzu volného stavu



3.8 Modelování průjezdu vlaku kolem IB

V [14] je vytvořen model pro analýzu průjezdu vlaku kolem informačního bodu s modelováním jednotlivých šuntů (soukolí). Model byl vytvořen jak pro nízkofrekvenční analýzy, tak pro analýzy na vysokých kmitočtech. Analýza zachycuje napětí a proudy v kolejovém obvodu v závislosti na vzdálenosti středu vlaku od IB, a to v rozsahu vzdáleností ± 400 m. Bylo zjištěno, že na vysoké frekvenci je možné detekovat průjezd vlaku, ale byl zjištěn problém s detekcí směru průjezdu. Tento problém může být řešen úpravou analýzy tak, aby bylo možné z těchto analýz odečíst napětí ve vzdálenostech 5, 10 a 20 metrů od IB, a zjistit průběhy těchto napětí v závislosti na poloze středu vlaku pro různé délky vlaku, různé vzdálenosti mezi nápravami a různé impedance šuntu [13].

Analýza průjezdu vlaku se provádí ve třech částech. V první je vlak celý před IB, ve druhé vlak projíždí přes IB, a ve třetí je vlak celý za IB. Analýza je provedena diskrétně v krocích daných vzdáleností mezi nápravami vlaku, a to tak, že při samotném průjezdu vlaku přes IB je KO analyzován vždy ve chvíli, kdy je jedna z náprav přímo nad IB. Obvod pro analýzu je podobný jako obvod pro analýzu šuntového stavu, ale liší se v okolí IB [13].

V první části analýzy, když je vlak celý před IB, je analýza stejná jako analýza šuntového stavu, ale jeden šunt je nahrazen soustavou podélných a příčných impedancí, kde podélné impedance odpovídají podélné impedanci kolejnic mezi dvěma soukolími, a příčné impedance odpovídají součtu šuntové impedance a příčné impedance mezi kolejnicemi o dané délce. Dále jsou kolejové úseky před a za vlakem zkráceny tak, aby byla zachována celková délka modelovaného obvodu 3 km. Analýza probíhá tak, že se vždy změní délka EKV před a za vlakem, tím se vlak „posune“ po KO, a pomocí knihovny PraCA jsou vypočteny hodnoty napětí a proudů v obvodu [13].

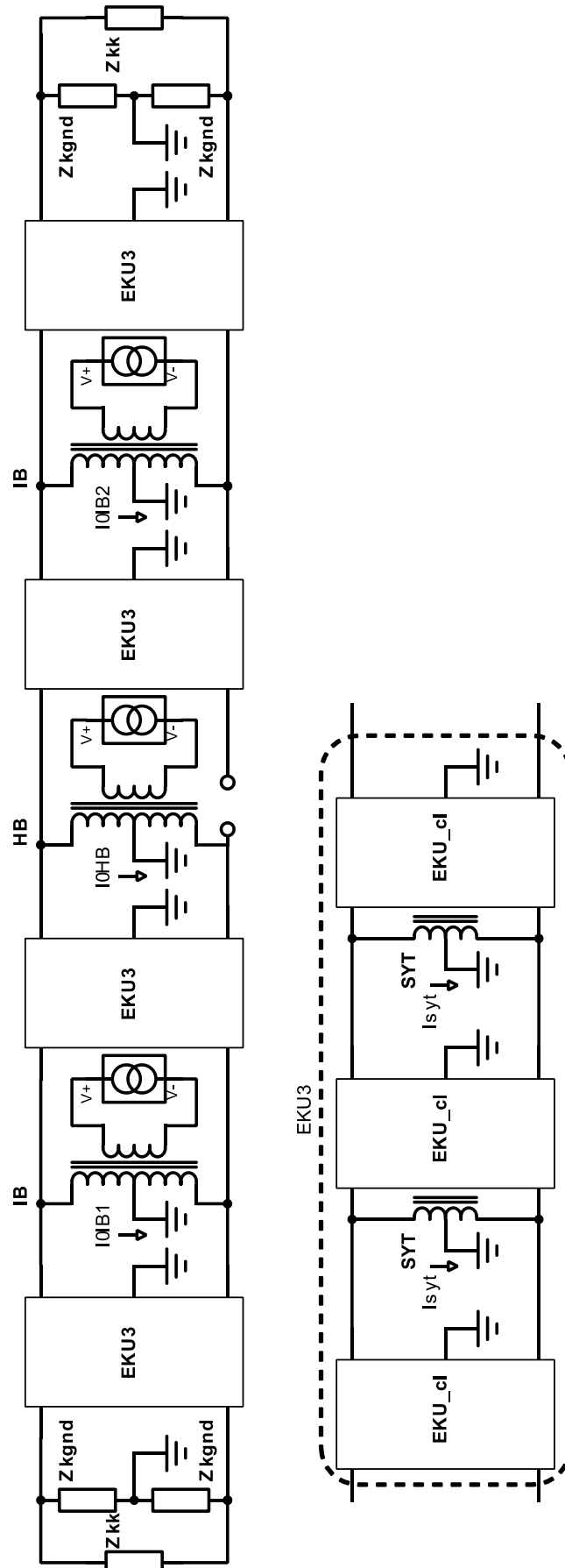
Ve druhé části je IB vyjmut z netlistu (popisu obvodu), vlak je umístěn na jeho místo. IB se pak postupně zapojuje do obvodu paralelně k jednotlivým šuntům (soukolím) vlaku, zároveň se opět mění délka EKV před a za vlakem, tím se vlak „posouvá“ po trati a zároveň se IB nachází vždy na správném místě trati a pod správným soukolím vlaku [13].

Ve třetí fázi vše probíhá stejně jako v první fázi, jen se vlak nachází napravo od IB [13].

Schémata modelů uvedených v [14] zde nejsou uvedena, protože v popisu vlastní práce autora jsou uvedena schémata upravených obvodů, viz Obrázek 7.1-1, Obrázek 7.1-2 a Obrázek 7.1-3. Vkládání dalších schémat by zbytečně práci nafukovalo.

3.9 Modelování havarijního stavu

Pro analýzu havarijního stavu je použit obvod, který ukazuje Obrázek 3.9-1. Modely transformátoru, tlumivky, úseku EKV a zakončení obvodu popisují kapitoly 3.4 až 3.6. Lom kolejnice je simulován rozpojením obvodu v daném uzlu. Protože algoritmus, který toto rozpojení zajišťuje, řešil autor samostatně, je tento algoritmus popsán v kapitole 5.4 Analýza havarijního stavu.



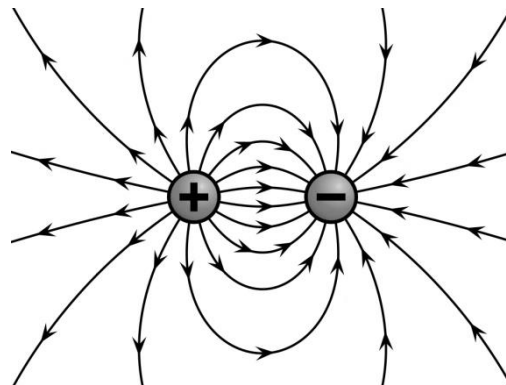
Obrázek 3.9-1: Obvodový model NKO pro analýzu havarijního stavu s vyznačeným lomem kolejnice napravo od HB (překresleno z [14])

3.10 Zpřesnění analýzy havarijního stavu pomocí modelování zemních proudů

V předchozích modelech byla zem reprezentována jedním uzlem, do kterého byly přes odpory R_i připojeny středy transformátorů DT 0,75 a tlumivek SYT (viz Obrázek 3.9-1). Dále byly přes svodové odpory připojeny jednotlivé články kolejí. Není však jasné, zda tento zjednodušený model země pod kolejovým obvodem nevnaší do analýz havarijního stavu nepřijatelné chyby. Provedl jsem proto rešerši způsobů, jak by se země mohla modelovat přesněji.

V prvním přiblížení lze zem považovat z hlediska elektrického odporu za homogenní izotropní látku, tj. elektrická rezistivita země je v každém místě a v každém směru stejná. Ve skutečnosti je země nehomogenní, odpor může s hloubkou růst nebo klesat, protože silně závisí na vlhkosti půdy, která se často s hloubkou mění. Dále, pokud je zkoumaná oblast nesourodá, například nachází-li se na hranici dvou geologických útvarů, na svahu, či nachází-li se v oblasti kopec, údolí, násep, či zářez, závisí rezistivita země i na poloze [15].

Pokud je zem považována za homogenně a izotropně elektricky vodivou, proud mezi dvěma body v takové látce volně teče po dráhách odpovídajících siločárám intenzity elektrického pole mezi těmito body. Tyto siločáry ve dvou rozměrech ukazuje Obrázek 3.10-1. V zemi pak proud teče ve třech rozměrech a je omezen pouze zemským povrchem [15].



Obrázek 3.10-1: K výkladu zemního proudu – rozložení proudového pole pro dvě kulové elektrody v homogenním médiu [16]

Z tohoto vyplývá, že proudová hustota je největší v bezprostřední blízkosti elektrod, kterými do země vtéká a z ní vytéká. Uprostřed cesty proudu je jeho proudová hustota nejmenší. V blízkosti elektrod, kde je proudová hustota vysoká, tak musí proud protékat poměrně malým průřezem, a překonává tak velký odpor. V prostoru na polovině vzdálenosti mezi elektrodami, kde je proudová hustota malá, protéká proud obrovským průřezem a překonává tak velice malý odpor.

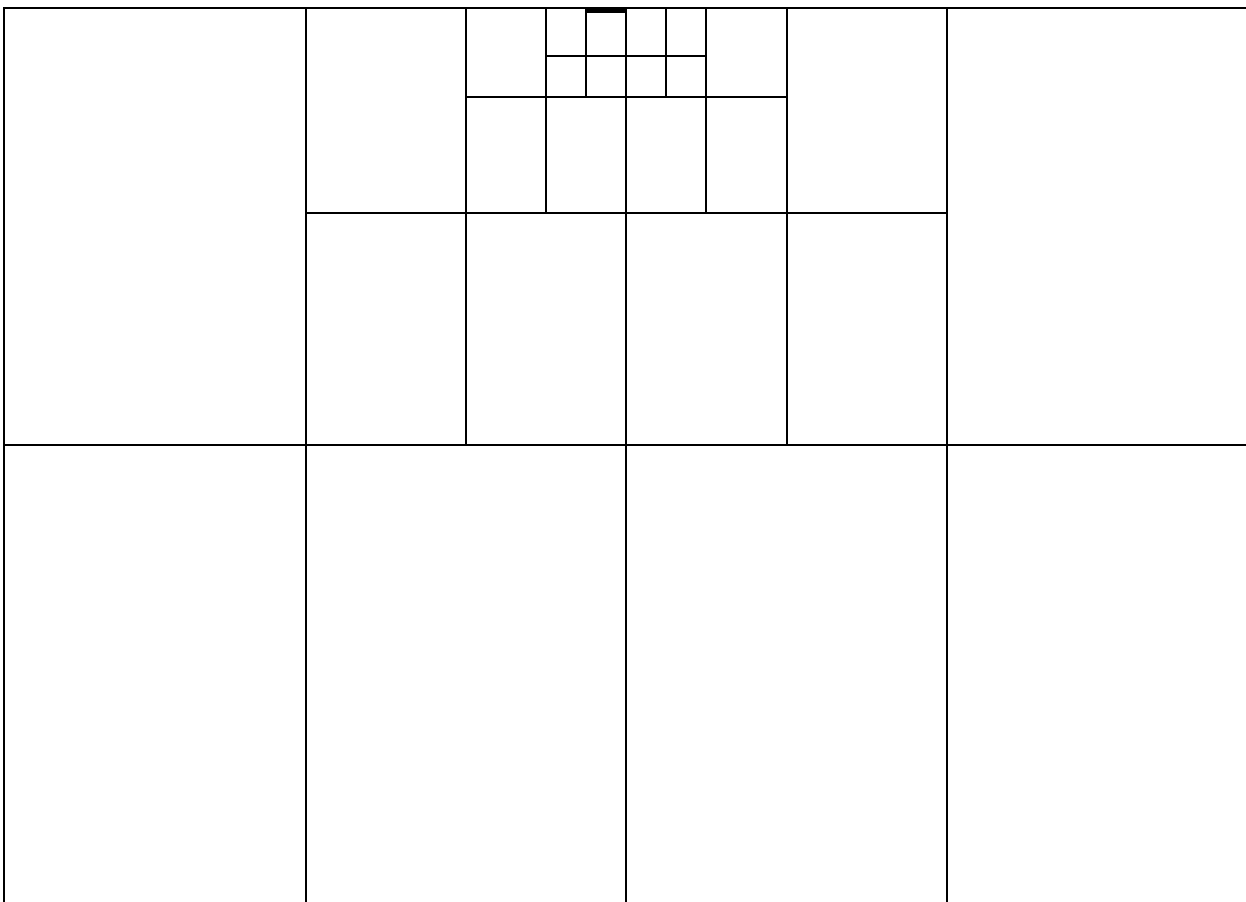
Pro jednoduché či zjednodušené případy (bodové, kulové, přímkové nebo válcové nekonečné elektrody) lze analyticky odvodit ekvivalentní odpor mezi dvěma elektrodami v závislosti na jejich vzdálenosti a rezistivitě půdy. Tento odpor ale na vzdálenosti nezávisí lineárně. Jinak řečeno, pokud je doprostřed mezi dvě elektrody vložena elektroda třetí, ekvivalentní odpor mezi touto elektrodou a jednou z původních elektrod není roven polovině ekvivalentního odporu mezi původními elektrodami. Z tohoto důvodu není možné půdu bez zjednodušení nahradit jednorozměrným modelem, složeným z rezistorů, jejichž hodnoty by byly analyticky odvozeny [15, 17].

Obvodově lze zem aproximovat pomocí metody konečných prvků. Analyzovaná oblast země se rozdělí na krychle o konečném objemu. Každá tato krychle je v obvodu znázorněna jako uzel, který je se sousedními uzly spojen pomocí rezistencí, které odpovídají rezistenci jedné krychle. Jako u každé metody



konečných prvků platí, že čím delší zvolíme stranu krychle, tím je výpočet méně náročný, ale také dává méně přesné výsledky.

Pokud jsou pro simulaci HS použity 3 články na 500 m koleje, tak je každých 166,766 m koleje reprezentováno jedním článkem. Protože je každý článek uzemněn (a bylo by žádoucí zemnit každý článek do jiné buňky v zemi), je třeba volit délku strany krychle 166,766 m nebo celé zlomky tohoto čísla. Pro zjednodušení je možné uvažovat, že naprostá většina proudu teče uvnitř pomyslné koule vložené mezi elektrody. Maximální šířka analyzované oblasti pak může být odhadnuta přibližně rovna délce oblasti; maximální hloubka rovna polovině délky. Pro délku analyzované oblasti 6 km vychází oblast 6*6*3 km. Při délce strany jedné krychlové buňky 166,766 m je to $36 * 36 * 18 = 23\,328$ krychlí (uzlů). V průměru na jednu krychli připadají 3 rezistence, kterými se váže na své sousedy. Pak by tento model země do netlistu analyzovaného KO přidal necelých 70 000 rezistencí. Takový model by neúměrně prodloužil výpočetní nároky analýzy. Model je ale možné zjednodušit tak, že krychle přímo pod kolejí budou mít délku strany 166,66 m, ale buňky dál od koleje (do strany i do hloubky) budou mít krychle s dvojnásobnou délkou strany. V další optimalizaci mohou být ještě vzdálenější krychle ještě větší. Model by pak nejpřesněji reprezentoval proudy tekoucí přímo pod kolejí, a proudy tekoucí dále od koleje by reprezentoval hruběji. Obrázek 3.10-2 ukazuje příčný řez takovým optimalizovaným modelem. Buňky, které jsou dál od koleje, jsou mnohem větší než buňky, které jsou přímo pod kolejí. Buňka, na které leží kolej, má zvýrazněný horní okraj.



Obrázek 3.10-2: K ilustraci optimalizovaného modelu země modelované metodou konečných prvků

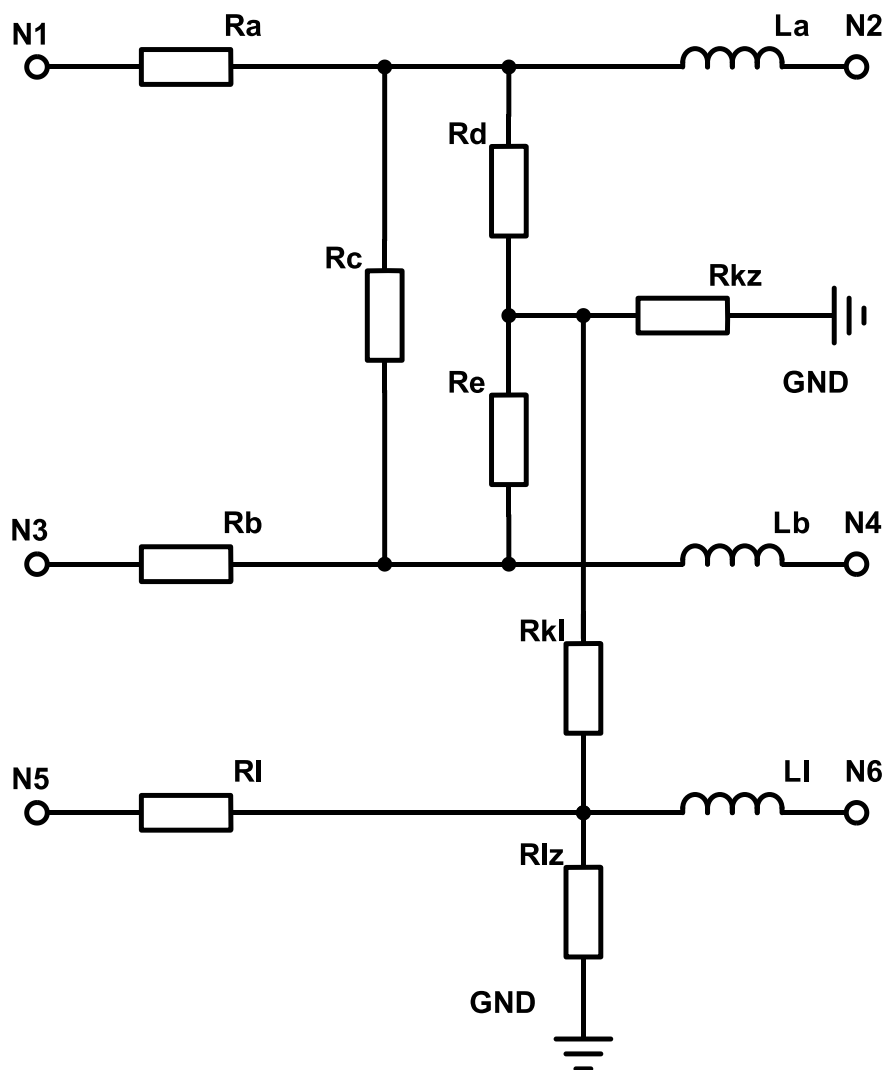
Tento optimalizovaný model by měl přibližně 500 krychlí (uzlů) a necelých 1 500 rezistencí mezi nimi. Pořád je to velmi hodně, ale už to je reálně řešitelné.

Jiný způsob zjednodušení spočívá v tom, že, jak je výše zmíněno, největší odpor stojí proudu v cestě v nejbližším okolí elektrod. Odpor země, která se nenachází v tomto blízkém okolí, tak může být zanedbán. Tato zem v rámci zjednodušení může být považována za ideální vodič, a v modelu být

reprezentována jedním uzlem. Na tento uzel pak v modelu povedou rezistence z jednotlivých elektrod, které budou představovat rezistence mezi elektrodou a ekvipotenciální hladinou v určité vzdálenosti od ní. Toto zjednodušení bude podhodnocovat odpor země. Je to řešení, které je blízké dosavadnímu modelu, používanému v analýzách. V této práci bude tento model dále rozpracován. Schází pouze doplnit hodnoty odporů uzemnění středů transformátorů a tlumivek.

3.11 Modelování havarijního stavu NKO se zemním lanem

Pro zjednodušení odvodu trakčního proudu, snížení odporu zpětné trakční cesty a možného snížení potřebného počtu uzemnění je pravděpodobné, že se NKO bude instalovat se zemním lanem. Na vysokorychlostních tratích (vrt), kde je přístupu neoprávněných osob ke kolejišti zamezeno pomocí plotů a bezpečnostních kamer, bude použito měděné lano Cu 50 mm². Na běžných tratích se bude NKO provozovat zcela bez lana, nebo s lanem ze slitiny FeAl či z pozinkované oceli ZnFe. Pro účely této práce bylo uvažováno měděné zemní lano. Aby bylo možné lano do analýz zahrnout, bylo třeba vyřešit způsob, jakým toto zemní lano, které je bez izolace uloženo v zemi, korektně modelovat v rámci článkového modelu NKO pro HS. Pro tento účel byl článkový model EKU rozšířen o prvky, které modelují zemní lano a odpor půdy v okolí kolejového obvodu. Tento článkový model ukazuje Obrázek 3.11-1.



Obrázek 3.11-1: Schéma jednoho článku v článkovém modelu koleje se zemním lanem a odporem země.



Dále bylo třeba určit jednotlivé parametry, které reprezentují nově přidané prvky:

- $R_l (\Omega \cdot km^{-1})$ - Sériová rezistence lana
- $L_l (H \cdot km^{-1})$ - Sériová indukčnost lana
- $R_{kz} (\Omega \cdot km)$ - Rezistence mezi prostorem svršku a vzdáleným prostorem v půdě
- $R_{kl} (\Omega \cdot km)$ - Rezistence mezi prostorem svršku a zemním lanem
- $R_{lz} (\Omega \cdot km)$ - Rezistence mezi zemním lanem a vzdáleným prostorem v půdě

Určením těchto parametrů se zabývají následující podkapitoly.

3.11.1 Sériová impedance lana

Norma ČSN EN 60228 v Tabulce 2 určuje maximální odpor pletených měděných lan průřezu 50 mm^2 bez pokovení jako $0,387 \Omega/\text{km}$. Po stránce odporu tak bude zemní lano modelováno jako do série zapojené rezistence s hodnotou závisící na jemnosti článkování lana. Jako nejvhodnější se zdá zvolit jemnost článkování stejnou jako u svršku EKU, jak bylo řešeno v kapitole 5.1. Dále je odpor lana zvyšován působením skin efektu a činnými ztrátami v proudu indukovaným v okolní zemině. Vliv skin efektu na odpor lana vyjadřuje koeficient skin efektu k_{AC} [18, 19]:

$$k_{AC} = \frac{S_{DC}}{S_{AC}} = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} \quad (-) \quad (19)$$

Kde S_{AC} je efektivní průřez vodiče protékáný střídavým proudem (v mm^2).
 S_{DC} je celkový průřez vodiče (v mm^2).
 R_{AC} je efektivní odpor vodiče pro střídavý proud (v Ωkm^{-1}).
 R_{DC} je odpor vodiče pro stejnosměrný proud (v Ωkm^{-1}).

S_{AC} lze získat z průměru vodiče d a z hloubky průniku proudu do vodiče δ [19]Ⓜ:

$$S_{AC} = \pi \cdot d \cdot \delta \quad (\text{mm}^2) \quad (20)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (\text{mm}) \quad (21)$$

Tento výraz ale platí pouze pro $d \gg \delta$, což zde určitě neplatí. Pro $d \approx \delta$ je výsledek zatížený velkou chybou, a pro $d < \delta$ dokonce vychází $S_{AC} > S_{DC}$. V [19] je uvedena přesnější metoda pro určení S_{AC} [19]Ⓜ:

$$S_{AC} = \pi(2 \cdot r \cdot \delta' - \delta'^2)(1 + Y) \quad (\text{mm}^2) \quad (22)$$

Kde r je poloměr vodiče (v mm).
 δ' je kompenzovaná hloubka průniku proudu (v mm).
 Y je opravný člen (-).

$$\delta' = \delta \left(1 - e^{-\frac{r}{\delta}}\right) \quad (\text{mm}) \quad (23)$$

$$Y = \frac{0,189774}{(1 + 0,272481(Z^{1,82938} - Z^{-0,99457})^2)^{1,0941}} \quad (-) \quad (24)$$

Kde:

$$Z = 0,62006 \frac{r}{\delta} \quad (-) \quad (25)$$

Vodivost vodiče získáme z odporu a průřezu:

$$\rho = R_{DC} \cdot S \quad (\Omega \cdot m) \quad (26)$$



Zvýšení rezistence lana vlivem okolní půdy bude popsán níže. Indukčnost zemního lana se skládá z jeho vlastní indukčnosti, indukčnosti způsobené indukovanými proudy v okolní zemině a vzájemné indukčnosti vůči kolejnicím a trakčnímu vedení [20, 21].

Rosa [21] odvodil vlastní indukčnost válcového vodiče jako [21]:

$$L = 2 \cdot \left(l \cdot \ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} \right) - \sqrt{l^2 + r^2} + \frac{l}{4} + r \right) \text{ (nH)} \quad (27)$$

Kde l je délka vodiče protékaného proudem (v cm).

r je poloměr tohoto vodiče (v cm).

Tato indukčnost je nelineárně závislá na délce vodiče. V reálném modelu potečou proudy zemním lanem většinou mezi uzemněními dvou sousedních transformátorů anebo tlumivek, tedy po délce 500 m. Některé proudy ale potečou na delší vzdálenost. Proto se jeví nejlepší (pro co nejmenší chybu výpočtu) dosadit hodnota $l = 1 \text{ km}$. Výsledek pak bude přímo v $(\text{nH} \cdot \text{km}^{-1})$.

Vzájemná indukčnost je odvozena jako [21]:

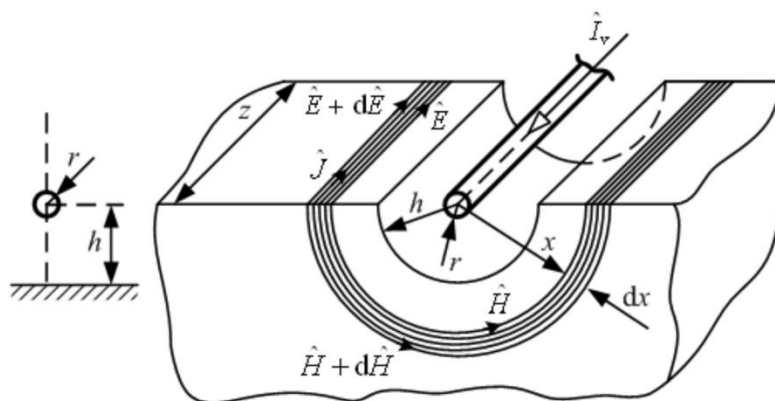
$$M = 2 \cdot \left(l \cdot \ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{l^2 + d^2} + d \right) \text{ (nH)} \quad (28)$$

Kde l je délka vodičů (v cm).

r je vzdálenost těchto vodičů (v cm).

Pro určení vzájemné indukčnosti s kolejnicemi a s trakčním vedením je možné použít princip superpozice, kde lze každou vzájemnou indukčnost určit zvlášť. Protože ale je ale v současném modelu zanedbána vzájemná indukčnost mezi kolejnicemi, která je mnohem silnější, není důvodné vzájemné indukčnosti lana a ostatních kovových prvků modelovat.

Pro zjištění indukčnosti a činného odporu způsobené vlivem okolní zeminy je možné použít Rűdenbergovu metodu užívanou v energetice. Tu ilustruje Obrázek 3.11-2. Protože je vodič uložený v malé hloubce pod povrchem, rozdíl je pouze v tom, že zde není žádná vzduchová mezera mezi lanem a zeminou. Protože je ale v Rűdenbergově metodě výška vodiče nad zemí zanedbatelná vůči hloubce fiktivního vodiče v zemi, výpočet se nemění [22].



Obrázek 3.11-2: K výkladu Rűdenbergovy koncepce (převzato z [22])

$$\hat{Z}_{1g} = R_{1g} + jX_{1g} \quad (29)$$

$$R_{1g} = \pi^2 f \cdot 10^{-3} \text{ (}\Omega \text{ km}^{-1}\text{)} \quad (30)$$

$$X_{1g} = 2\pi f \cdot 10^{-3} \cdot 0,46 \log \left(\frac{D_g}{\xi \cdot r} \right) \text{ (}\Omega \text{ km}^{-1}\text{)} \quad (31)$$

Z toho indukčnost:



$$L_{1g} = 10^{-3} \cdot 0,46 \log \left(\frac{D_g}{\xi \cdot r} \right) (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (32)$$

Kde D_g je hloubka, ve které je v zemi umístěn fiktivní vodič [22]:

$$D_g = 0,178 \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{f}} (m) \quad (33)$$

Kde ρ je rezistivita země ($\Omega \cdot m$) [22]

ξ je činitel, který zohledňuje nerovnoměrnost rozložení proudové hustoty ve vodiči a jeho relativní permeabilitu [22]:

$$\xi = 10^{-\frac{0,05 \mu_{rv} \alpha}{0,46}} (-) \quad (34)$$

Pro μ_{rv} (relativní permeabilita vodiče), α (činitel skin efektu ve vodiči) ≈ 1 :

$$\xi = 10^{-\frac{0,05 \cdot 1 \cdot 1}{0,46}} \cong 0,7786 (-) \quad (35)$$

V [23] je pro vnější impedanci vodičů na vedení uveden výpočet pomocí Carsonovy metody:

$$\hat{Z}_{ext} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \left(\frac{D'_{11}}{r_1} \right) & \dots & \ln \left(\frac{D'_{1n}}{d_{1n}} \right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \left(\frac{D'_{n1}}{d_{n1}} \right) & \dots & \ln \left(\frac{D'_{nn}}{r_n} \right) \end{bmatrix} (\Omega m^{-1}) \quad (36)$$

Kde:

$$D'_{ij} = \sqrt{(y_i + y_j + 2p)^2 + (x_i + x_j)^2} (m) \quad (37)$$

$$p = \sqrt{\frac{1}{j\omega\mu_e(\sigma_e + j\omega\varepsilon_e)}} (m) \quad (38)$$

Kde D'_{ij} je vzdálenost mezi vodičem i a fiktivním vodičem v zemi j .

r_i je poloměr vodiče i .

d_{ij} je vzdálenost mezi vodičem i a vodičem j .

y_i, y_j jsou souřadnice y (vertikální) vodičů i, j .

x_i, x_j jsou souřadnice x (horizontální) vodičů i, j .

p je komplexní hloubka fiktivního vodiče v zemi.

μ_e je magnetická permeabilita země.

σ_e je elektrická vodivost země.

ε_e je elektrická susceptibilita země.

Pro případ jednoho vodiče umístěného na povrchu země se vztahy zjednoduší:

$$\hat{Z}_{ext} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D'}{r} \right) (\Omega m^{-1}) \quad (39)$$

$$D' = 2 \sqrt{\frac{1}{j\omega\mu_e(\sigma_e + j\omega\varepsilon_e)}} (m) \quad (40)$$

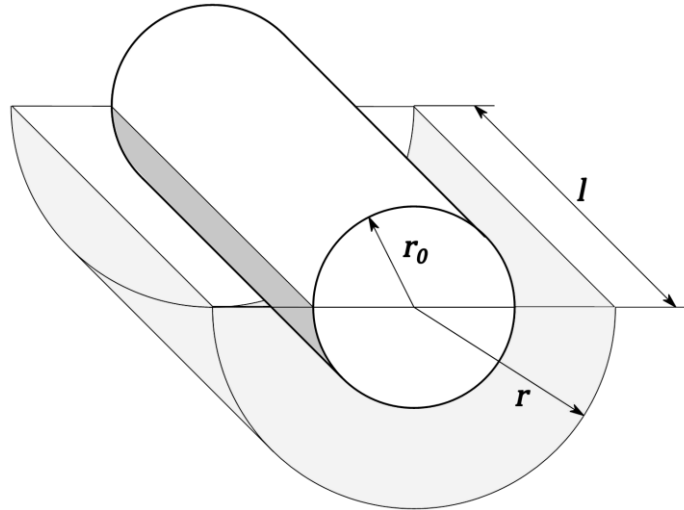
Pro Cu 50 lano a běžné hodnoty parametrů půdy vychází z obou metod podstatně rozdílné výsledky. Vzhledem k tomu, že první metoda používá různé konstanty, které nejsou nijak uvedeny, zatímco metoda

druhá používá pouze základní konstanty, bude v dalším výpočtu použita metoda druhá. Po dosažení vychází impedance lana způsobená vlivem země jako:

$$\hat{Z}_{ext} = 0.07402 + j \cdot 1.250 (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (41)$$

3.11.2 Svod lana do země

Pro účely zjištění svodu může být zemní lano považováno za válcovou elektrodu. V prvním přiblížení lze uvažovat, že je tato elektroda umístěna na povrchu země a z poloviny je v ní zahrabaná, jak naznačuje Obrázek 3.11-3 [15, 24].



Obrázek 3.11-3: K Vysvětlení svodu zemního lana (překresleno z [24])

Vzhledem k tomu, do jaké hloubky svodový proud z elektrody proniká, je malá hloubka, ve které je zemní lano uloženo, zanedbatelná. Proudová hustota elektrického pole na myšlené ploše o poloměru r , odpovídající polovině pláště myšleného válce (naznačena na obrázku žlutě), je pak [24]:

$$J(r) = \frac{I}{\pi \cdot r \cdot l} \quad (42)$$

Intenzita elektrického pole na této ploše je pak [24]:

$$E(r) = J(r) \cdot \rho = \frac{I \cdot \rho}{\pi \cdot r \cdot l} \quad (43)$$

Integrací elektrického pole dostaneme napětí mezi elektrodou a myšlenou plochou ve vzdálenosti x [24]:

$$U = \int_{r_0}^x E(r) dr = \frac{I \cdot \rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{x}{r_0}\right) \quad (44)$$

Odpor zeminy mezi elektrodou a touto myšlenou plochou získáme z Ohmova zákona [24]:

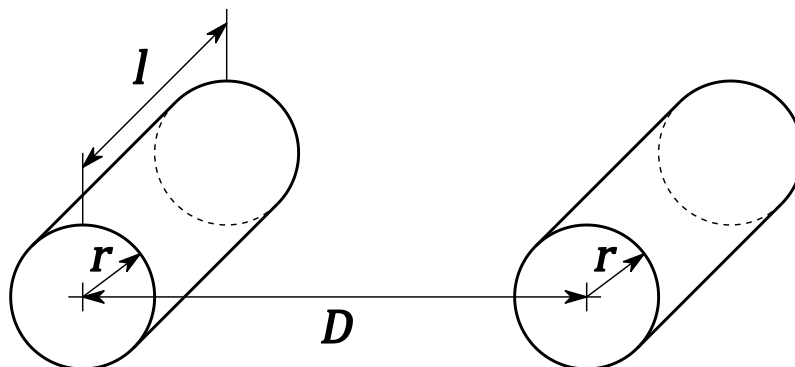
$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{x}{r_0}\right) \quad (45)$$

Tento výraz pro $x \rightarrow \infty$ diverguje, pro reálné x, r_0 ; $x > r_0$ má kladné řešení. Problém s divergencí svodového odporu lze vyřešit dvěma způsoby. Za prvé, pokud bude země modelována pomocí trojrozměrné odporové sítě, může být x zvoleno jako polovina délky strany krychle v této síti. Případně může x být zvoleno tak, aby se objem poloviny válce, jejíž odpor je zjišťován, rovnal objemu poloviny krychle výpočetní sítě [24].

Za druhé, pokud bude zem modelována jako jeden uzel, nelze korektně tento svod vyjádřit. Hodnota x ale může být určena například na základě odhadu nejdelsí, nebo nejčastější vzdálenosti, do které proud z lana vytéká, než se vrátí zpět do kolejového obvodu skrze nějakou jeho další uzemněnou část.

3.11.3 Svod mezi lanem a svrškem

V základní analýze havarijního stavu byl zohledněn odpor mezi kolejnicemi a svrškem. Pokud je lano uloženo v zemi poblíž koleje, je třeba zohlednit také svod mezi lanem a svrškem. Součtem těchto dvou rezistencí pak bude určen svod mezi lanem a jednotlivými kolejnicemi, který může být podstatný pro detekci havarijního stavu. V prvním přiblížení je možné si svod mezi svrškem a lanem představit jako svod mezi dvěma válcovými elektrodami v nekonečném elektricky vodivém médiu. Tuto situaci ukazuje Obrázek 3.11-4.



Obrázek 3.11-4: Ilustrace svodu mezi dvěma vodiči (překresleno z [25])

Autorovi se nepodařilo najít žádnou literaturu, která řeší tuto konfiguraci elektrod. V [25] je ale řešena stejná konfigurace pro přenos tepla vedením. A protože přenos tepla vedením je případ zřídlového pole, stejně jako proudové pole, které je řešeno zde, jedná se o analogický případ. Úpravou vztahu z Holmana získáme vztah pro odpor mezi dvěma vodiči [25]:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cosh^{-1} \frac{D^2 - r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 r_2} \quad (46)$$

Kde r_1 a r_2 jsou poloměry jednotlivých vodičů.

Poloměr zemního lana je dán celkem jasně. Poloměr elektrody, která reprezentuje železniční svršek, je třeba zvolit. Protože lze ale říci, že proud v oblasti svršku prochází větší plochou, než je povrch zemního lana, bude celkový odpor dán hlavně odporem v oblasti zemního lana. Na přesnosti určení plochy, kterou prochází proud v oblasti svršku, tak tolik nezáleží, pokud bude poloměr tohoto „vodiče“ volen větší, než je poloměr lana. Jako vhodná hodnota poloměru pro svršek se jeví zvolit polovina rozchodu koleje, tedy $1435/2 = 717,5 \text{ mm}$.

3.11.4 Odpor země mezi oblastí železničního svršku a „vzdáleným místem“.

V předešlých analýzách byl odpor mezi kolejnicemi a zemí převzat z [4]. K uvedeným hodnotám není poskytnuto mnoho vysvětlení. Jsou ale uvedeny pro potřebu řešení havarijního stavu u ohraničených kolejových obvodů. Lze proto předpokládat, že v tomto případě je myšlená země poměrně blízko oblasti železničního svršku [4].

Pro tuto analýzu je ale třeba vyjádřit i odpor půdy v oblasti mezi železničním svrškem a vzdálenou plochou tvaru poloviny pláště válce, jako v případě kapitoly 3.11.2. Tento odpor lze určit podle stejné metody, jakou ilustruje Obrázek 3.11-3. Podobně jako v předcházející kapitole se jeví jako vhodný odhad použít jako poloměr vodiče r polovinu rozchodu koleje, tedy $1435/2 = 717,5 \text{ mm}$.



4 ZJIŠŤOVÁNÍ PARAMETRŮ PRO ANALÝZY

Tato kapitola popisuje, jak a odkud byly získány parametry pro analýzy provedené v rámci této práce.

4.1 Parametry pro analýzy na nízkých kmitočtech

Pro analýzy na nízkých kmitočtech byly všechny parametry výstroje získány měřením v [26, 27]. Pro kmitočty, kde parametry nebyly měřeny, byly v [27, 28] provedeny interpolace ze změřených hodnot. Protože však analýzy na nízkých kmitočtech zde popsané sloužily hlavně k tomu, aby autor do problematiky pronikl, a byly tak prováděny pouze na kmitočtu 75 Hz, byly všechny parametry získány přímým měřením [29, 30, 26, 27, 28].

Parametry svršku pro nízké kmitočty byly na základě literatury, normy TNŽ 34 2613-1 a expertního odhadu určeny doktorem Sadilem [31]. Parametr velikosti šuntu a svodu mezi kolejnicemi jsou pak nezávislémi proměnnými v analýzách [31].

Parametry svršku pro danou frekvenci jsou [4]:

$$Z_l = 0,84 \angle 71^\circ \Omega/km \qquad Y_p = 0,5 S$$
$$p = 0,5$$

Parametry tlumivky SYT jsou [12]:

$$R_1 = R_2 = 8,85 m\Omega \qquad R_z = 20 \Omega$$
$$L_1 = L_2 = 2,9 \mu H \qquad L_z = 4,3 mH$$

Parametry transformátoru ze strany sekundárního vinutí jsou [12]:

$$\frac{R_{p1}''}{2} = \frac{R_{p2}''}{2} = 6,932 \Omega \qquad \frac{L_{p1}''}{2} = \frac{L_{p2}''}{2} = 13,14 mH$$
$$R_2'' = 2,264 \Omega \qquad L_2'' = 4,293 mH$$
$$R_z'' = 6,305 k\Omega \qquad L_z'' = 841,8 mH$$

A tyto parametry přepočtené na stranu primárního vinutí jsou [12]:

$$\frac{R_{p1}'}{2} = \frac{R_{p2}'}{2} = 3,93 m\Omega \qquad \frac{L_{p1}'}{2} = \frac{L_{p2}'}{2} = 7,449 \mu H$$
$$R_2' = 1,284 m\Omega \qquad L_2' = 2,433 \mu H$$
$$R_z' = 3,574 \Omega \qquad L_z' = 477,2 \mu H$$

V modelu jsou zadány parametry ze strany sekundárního vinutí. Hodnoty těchto prvků pro Z_{DT} (impedance transformátoru DT 0,75 naprázdno) a Z_{HB} (ekvivalentní impedance nekonečné koleje s výstrojí, měřená od hlavního bodu) pro 75 Hz jsou [12]:

$$R_{DT} = 2,89 \Omega \qquad L_{DT} = 485,7 \mu H$$
$$R_{HB} = 2,069 \Omega \qquad L_{HB} = 2,846 mH$$

Nastavení proudových zdrojů v hlavním a informačních bodech jsou převzata od doc. Hospodky [14]:

$$|I_{HB}| = 0,5 A \qquad \varphi(I_{HB}) = \pi rad$$



$$|I_{IB}| = 0,12 A$$

$$\varphi(I_{IB}) = 3,05 rad$$

4.2 Původní parametry pro analýzy na vysokých kmitočtech

První analýzy, které autor prováděl, byly pouze úpravami analýz, které předtím provedl doc. Hospodka. Pro tyto analýzy byly všechny parametry převzaty. Posléze autor změřil parametry SYT a DT 0,75 na vysokých kmitočtech, aby ověřil a doplnil známé údaje. V souvislosti s tím došlo i ke zjištění, že v předchozích analýzách na 50 kHz byla použita nesprávná hodnota podélné impedance kolejnic Z_l . V této podkapitole jsou vyjmenovány původní parametry, v následující je popsáno laboratorní měření, a následuje podkapitola s parametry novými. V kapitolách, které popisují vlastní analýzy, pak bude určeno, se kterými parametry byly analýzy provedeny.

Parametry transformátoru DT075, tlumivky SYT a svršku pro frekvenci 50 kHz určili měřením, případně expertním odhadem, Hospodka a Sadil. Tyto parametry jsou [13]:

$$R''_{1STN} = R''_{2STN} = 1,12 k\Omega$$

$$L''_{1STN} = L''_{2STN} = -9 mH$$

$$R''_{pSTN} = 30 k\Omega$$

$$L''_{pSTN} = -7,5 mH$$

$$R_{1SYT} = R_{2SYT} = 0,6349 \Omega$$

$$L_{1SYT} = L_{2SYT} = -5,102 \mu H$$

$$R_{pSYT} = 85,03 \Omega$$

$$L_{pSYT} = -21,25 \mu H$$

$$Z_l = 220 \angle 89^\circ \frac{\Omega}{km}$$

$$Y_p = 1 \angle 76^\circ \frac{\Omega}{km}$$

$$p = 0,5$$

Základní šuntová impedance [13]:

$$Z_{s0} = 1,056 \angle 78,33^\circ \Omega$$

Napájení je nastaveno stejně jako pro 75 Hz, pouze na frekvenci 50 kHz [13]:

$$|I_{HB}| = 0,5 A$$

$$\varphi(I_{HB}) = \pi rad$$

$$|I_{IB}| = 0,12 A$$

$$\varphi(I_{IB}) = 3,05 rad$$

4.3 Měření parametrů stykového transformátoru DT 0,75 a symetrizační tlumivky SYT

Parametry transformátoru DT 0,75, použité pro výše popsané analýzy na 50 kHz, byly získané měřením pomocí RLC metru. Při tomto měření nemusel být měřený transformátor zatížen tak, jak bude zatížen v provozu. Ty parametry transformátoru, které jsou závislé na zatížení, pak mohly být změřeny špatně. Co je horší, parametry tlumivky SYT nebyly na 50 kHz měřeny vůbec, a byly pouze odhadnuty podle parametrů DT 0,75. Pro frekvence 10 a 30 kHz nebyly vůbec měřeny parametry ani jednoho z přístrojů.



Proto autor změřil parametry obou přístrojů na kmitočtech 0,075, 0,275, 1, 10, 30 a 50 kHz. Protože tlumivka SYT má vinutí rozdělené na dvě oddělené poloviny, jedná se vlastně o transformátor s převodem 1. Proto byly oba přístroje měřeny jako transformátory, kdy byly zjišťovány jejich impedance nakrátko a naprázdno. Tabulka 4.3-1 obsahuje seznam použitých měřicích přístrojů.

Tabulka 4.3-2 obsahuje výrobní čísla měřených přístrojů. Tento údaj může být důležitý pro porovnání s ostatními měřeními.

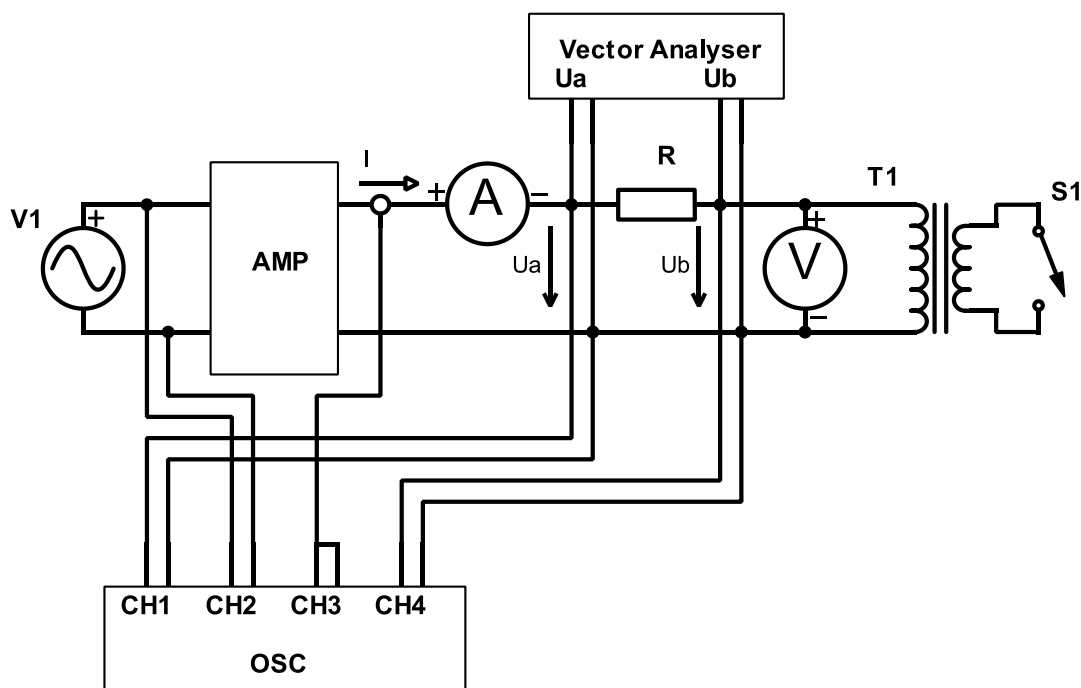
Tabulka 4.3-1: Použité měřicí přístroje a přípravky

	Popis přístroje	Výrobce	Typ
1.	generátor signálu	Agilent	33120A
2.	zesilovač	qsc	rmx 1450a
3.	sada odporů 33Ohm, 100W	/	/
4.	sada odporů 1 Ohm, 100W	/	/
5.	multimetr	Fluke	189
6.	multimetr	Keithley	2000
7.	osciloskop	Teledyne Lecroy	HDO6104-MS
8.	Vektorový analyzátor	Rohde&Schwarz	ZPV 291.4012

Tabulka 4.3-2: Měřené přístroje

	Popis přístroje	Výrobní číslo
1.	Transformátor DT0,75	B-0198/2015
2.	Tlumivka SYT	B-0091/2016

Aby byla do co největší míry vyloučena chyba měřicích přístrojů, byla impedance najednou měřena pomocí osciloskopu, dvojice multimetrů a vektorového analyzátoru.



Obrázek 4.3-1: Schéma zapojení pro měření parametrů transformátoru



Osciloskop přímo zaznamenává průběhy napětí a proudu a z nich určí absolutní hodnotu i fázi impedance. Pokud je ale proud nebo napětí na měřené impedanci příliš malé, měl osciloskop velkou chybu měření absolutní hodnoty a hlavně úhlu. To se stalo, pokud byla impedance velmi malá nebo naopak velmi velká.

$$Z_{osc} = \frac{U_b}{I} (\Omega) \quad (47)$$

Multimetry měly z použitých měřicích přístrojů největší měřicí rozsah a tak změřily vždy přesně napětí i proud, ze kterých bylo možné přesně určit absolutní hodnotu impedance. Nijak ale nepomohly určit fázi impedance.

$$Z_{mult} = \frac{U_b}{I} (\Omega) \quad (48)$$

Vektorový analyzář používá referenční impedanci zařazenou v sérii s měřenou impedancí. Poté změří poměr absolutních hodnot napětí před a za touto referencí a jejich vzájemný úhel. Hodnotu měřené impedance pak získáme z referenční impedance a změřeného komplexního poměru H :

$$Z_{VA} = Z_{ref} \cdot \frac{H}{1 - H} (\Omega) \quad (49)$$

Kde:

$$H = \frac{U_a}{U_b} (-) \quad (50)$$

Komplexní impedance výkonových rezistorů, které byly použity jako referenční impedance, byly pro každou měřenou impedanci změřeny RLC metrem. Použitý vektorový analyzář ale měl měřicí rozsah pouze do 1 V rms, což znamenalo potřebu použít měřicí sondy napětí s děličem $1 \div 10$, respektive $1 \div 100$. Tyto sondy v kombinaci se vstupem neměly ale vždy stejný převod, což do měření H vneslo chybu.

Ve výsledku byl ale vektor analyzář při měření úhlu impedance nejpřesnější pro všechny měřené impedance, proto byl použit pro měření úhlu impedance. Amplituda impedance byla vypočtena z měření pomocí multimetrů. Z měřených hodnot byly vypočteny parametry pro model transformátoru pro oba měřené objekty: z impedance nakrátko (Z_k) byla určena sériová rezistence R_1, R_2 a sériová indukčnost L_1, L_2 a z měření impedance naprázdno (Z_0) byly určeny parametry indukčnosti a rezistence železa R_p, L_p , které ukazuje Obrázek 3.4-1. Parametry byly určeny s předpokladem, že $R_1 \approx R_2$, $L_1 \approx L_2$, tedy že se impedance nakrátko Z_k dělí na poloviny na impedanci primárního a sekundárního vinutí. Toto s jistotou platí pro SYT, kde jsou obě vinutí téměř identická, u DT to lze považovat za dostatečnou aproximaci.

Parametry modelu transformátoru byly vypočteny takto:

$$R_1, R_2 = \frac{Re(Z_k)}{2}, L_1, L_2 = \frac{Im(Z_k)}{2} \quad (51)$$

$$R_p = \frac{1}{Re\left(\frac{1}{Z_0}\right)}, L_p = \frac{1}{Im\left(\frac{1}{Z_0}\right)} \quad (52)$$

Změřené parametry uvádí Tabulka 4.3-3 a Tabulka 4.3-4. Pro každý parametr sloupec označený „Měření“ uvádí parametry změřené v tomto měření pomocí výše popsané metody. Sloupec označený „RLC metr“ uvádí parametr získané ověřovacím měřením pomocí RLC metru. Sloupec označený „FEL“ uvádí předchozí měření ve stejné laboratoři na FEL ČVUT (v případě transformátoru na stejném kusu). Sloupec označený „AŽD“ uvádí parametry změřené na pracovišti AŽD v Brně. **Světle šedě** podbarveny jsou ty hodnoty, které se významně liší od změřených hodnot. **Tmavě šedě** podbarveny jsou ty hodnoty,



kteří si liší přibližně o řád. Naprostá většina předchozích měření byla provedena pouze do 1 kHz [29, 26, 30, 27].

Tabulka 4.3-3: Změřené parametry tlumivky SYT a jejich srovnání s předchozími měřeními [26]

f [kHz]	R_1, R_2 [m Ω]			L_1, L_2 [μ H]		
	Měření	RLC metr	FEL	Měření	RLC metr	FEL
0,075	8,339	7,811	8,93	2,523	2,513	2,9
0,275	8,441	7,918	9,03	2,303	2,196	2,8
1	8,875	8,323	9,53	2,154	2,145	2,85
10	23,27	18,72	/	1,894	1,905	/
30	42,62	37,35	/	1,714	1,785	/
50	61,75	51,12	/	1,582	1,736	/

f [kHz]	R_p [Ω]			L_p [mH]		
	Měření	RLC metr	FEL	Měření	RLC metr	FEL
0,075	8,339	4,091	19,92	4,152	0,7991	4,3
0,275	8,441	15,48	38,85	3,612	0,7743	4
1	8,875	48,67	636,9	2,636	0,7411	1,68
10	23,27	128,2	/	1,076	0,6591	/
30	42,62	162,7	/	0,6193	0,5381	/
50	61,75	189,8	/	0,5120	0,4570	/

Tabulka 4.3-4: Změřené parametry transformátoru DT 0,75 a jejich srovnání s předchozími měřeními (parametry jsou přepočtené na stranu vyššího napětí, převod 42) [27, 29]

f [kHz]	R_1, R_2 [Ω]				L_1, L_2 [mH]			
	Měření	RLC metr	FEL	AŽD	Měření	RLC metr	FEL	AŽD
0,075	7,823	7,427	2,432	4,329	8,653	9,117	4,574	7,707
0,275	9,847	9,304	15,71	6,269	8,038	8,218	4,185	8,149
1	18,07	15,36	48,73	9,872	7,008	7,130	3,684	7,392
10	74,90	54,86	/	/	5,746	5,765	/	/
30	634,1	375,1	/	/	9,116	8,943	/	/
50	1357	1430	1120	/	-7,914	-9,131	-9	/

f [kHz]	R_p [k Ω]				L_p [mH]			
	Měření	RLC metr	FEL	AŽD	Měření	RLC metr	FEL	AŽD
0,075	3,014	2,590	2,559	10,63	784,9	658,3	354	787,7
0,275	10,17	7,363	8,593	18,75	754,6	562,5	346	758,8
1	24,91	21,54	30,3	42,56	651,5	405,1	344	712
10	82,6	80,36	/	/	-597,4	-1334	/	/
30	40,82	67,42	/	/	-26,43	-28,53	/	/
50	17,96	26,01	30	/	-7,522	-7,92	-7,5	/

Některé neshody s předchozími měřeními (zejména u příčných parametrů R_p, L_p) lze vysvětlit nekonzistentní výrobou – tedy že parametry byly v obou případech změřeny dobře, ale měřené kusy se lišily. Neshody mezi měřeními RLC metrem a hlavním měřením jsou dány tím, že RLC metr měří impedanci pomocí napětí 2 V s předřadným odporem 50 Ω . To má za následek, že pro velice malé impedance je úbytek napětí na měřené impedanci velice malý. Velké impedance pak už RLC metr měřil



správně. Dále stojí za zmínku rozdíl v příčné indukčnosti a rezistenci SYT u měření „FEL“. Úhel příčné impedance se u těchto měření liší asi o 10 °, amplituda je ale podobná. I toto může být dáno jinými vlastnostmi měřeného kusu pro každé měření. V další výzkumné práci by mohlo být zajímavé zabývat se rozptylem parametrů při výrobě transformátorů DT 0,75 a tlumivky SYT a tím, jaký vliv může mít tento rozptyl na funkčnost kolejových obvodů.

Indukčnosti na vyšších kmitočtech pro transformátor DT 0,75 vycházejí záporně. To je dáno tím, že se při těchto měřeních transformátor už nacházel za rezonančním kmitočtem a vykazoval impedanci kapacitního charakteru. Pro jednoduchost náhrady ve stávajících analýzách bez nutnosti změny obvodového modelu transformátoru je ale jednodušší impedanci přepočíst na rezistenci a indukčnost, i když tato indukčnost vyjde záporná. Jelikož jsou parametry určovány zvlášť pro každý kmitočet, je takto získaný model transformátoru pro daný kmitočet přesný, i když záporná indukčnost je fyzikální nesmysl.

Při porovnání s předchozími měřeními a kontrolním měřením vychází najevo, že i přes některé neshody určitých parametrů vycházejí modely transformátorů podobně. Jedná o jediné měření na vysokých frekvencích, při kterém byly měřené přístroje zatíženy alespoň podobně, jako tomu je v reálných podmínkách kolejových obvodů. Poskytuje tak dostatečně kvalitní modely měřených přístrojů pro tyto kmitočty, a proto budou v dalších analýzách tyto parametry použity.

4.4 Nové parametry pro analýzy na vysokých kmitočtech

Protože oproti původním analýzám byly provedeny i analýzy na kmitočtech 10, 20 a 30 kHz, bylo třeba zjistit parametry pro tyto kmitočty.

Pro frekvence 10 a 50 kHz byly všechny potřebné parametry analýzy změřeny nebo získány z literatury nebo od kolegů. Některé parametry pro 30 kHz a všechny parametry pro 20 kHz byly získány lineární interpolací známých hodnot pro jiné frekvence. Vzhledem k nejistotám ohledně měření některých parametrů snahy o přesnější interpolaci daných frekvenčních závislostí nebyly namístě. Všechny frekvenčně závislé parametry uvádí Tabulka 4.4-1 [13].

Tabulka 4.4-1: Parametry transformátoru DT, tlumivky SYT, podélné impedance a impedance šuntu pro frekvence 10, 20 a 30 kHz.

f [kHz]	50	30	20	10
R''_{1STN}, R''_{2STN} [Ω]	1357	634,1	354,5	74,9
L''_{1STN}, L''_{2STN} [mH]	-7,914	9,116	7,413	5,745
R''_{pSTN} [k Ω]	18	40,8	61,71	82,6
L''_{pSTN} [mH]	-7,5	-26	-310	-0,6
R_{1SYT}, R_{2SYT} [m Ω]	61,75	42,62	32,95	23,27
L_{1SYT}, L_{2SYT} [μ H]	1,582	1,714	1,804	1,894
R_{pSYT} [Ω]	182,3	152,5	123	93,59
L_{pSYT} [mH]	0,512	0,6193	0,8476	1,076
Z_l [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]	436 \angle 89°	261 \angle 88°	174 \angle 88°	86,66 \angle 88°
Z_{s0} [Ω]	1,055 \angle 78,33°	0,6221 \angle 70,27°	0,4534 \angle 55,6°	0,2847 \angle 41°

Byla uvažována pouze základní hodnota admitance svodu mezi kolejnicemi:

$$Y_{p0} = 1\angle 76^\circ \text{ S/km}$$

Aby bylo možné různé frekvence vzájemně porovnávat, bylo napájení pro všechny frekvence stejné jako pro 75 Hz, pouze na příslušné frekvenci:

$$|I_{HB}| = 0,5 \text{ A}$$

$$\varphi(I_{HB}) = \pi \text{ rad}$$

$$|I_{IB}| = 0,12 \text{ A}$$

$$\varphi(I_{IB}) = 3,05 \text{ rad}$$



5 ANALÝZA HAVARIJNÍHO STAVU NKO PRO KMITOČET 75 Hz

Tato kapitola popisuje analýzu havarijního stavu neohraničeného kolejového obvodu na provozní frekvenci 75 Hz

Tvorba modelu pro havarijní stav je diskutována v kapitole 3.9. Pro analýzy VS a ŠS byl nejdříve použit obvod zakončený dvoubodovým zakončením, až po zjištění hodnot pro třibodové zakončení byla provedena ověřovací analýza s tímto třibodovým zakončením. Schéma obvodu tedy bylo stejné, jako ukazuje Obrázek 3.7-1, ale Eku3 a DT 0,75 byly modelovány tak, jak ukazuje Obrázek 3.9-1. Do modelu popsaného v této kapitole byly dosazeny parametry zjištěné v kapitole 4.1. Byla vytvořena procedura, která vytvoří podobvod Eku_cl s libovolným počtem článků. Podle rovnic (11) a (12) byly vypočteny nové hodnoty rezistencí R_c a R_d , které jsou uvedeny níže. Vypočítané parametry jsou:

$$R_a = R_b = \frac{68,37}{N} \text{ m}\Omega \qquad L_a = L_b = \frac{0,4214}{N} \text{ mH}$$
$$R_c = 5 \cdot N \Omega \qquad R_d = R_e = 10 \cdot N \Omega$$

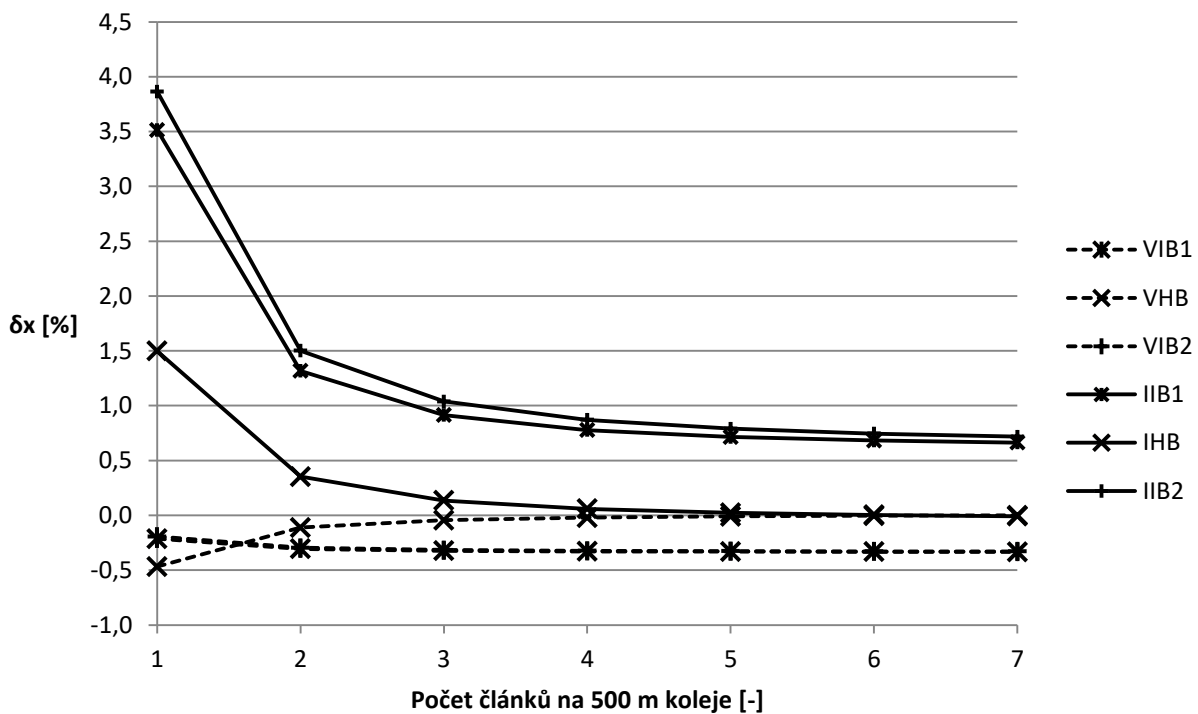
5.1 Analýza volného stavu NKO s dvoubodovým zakončením

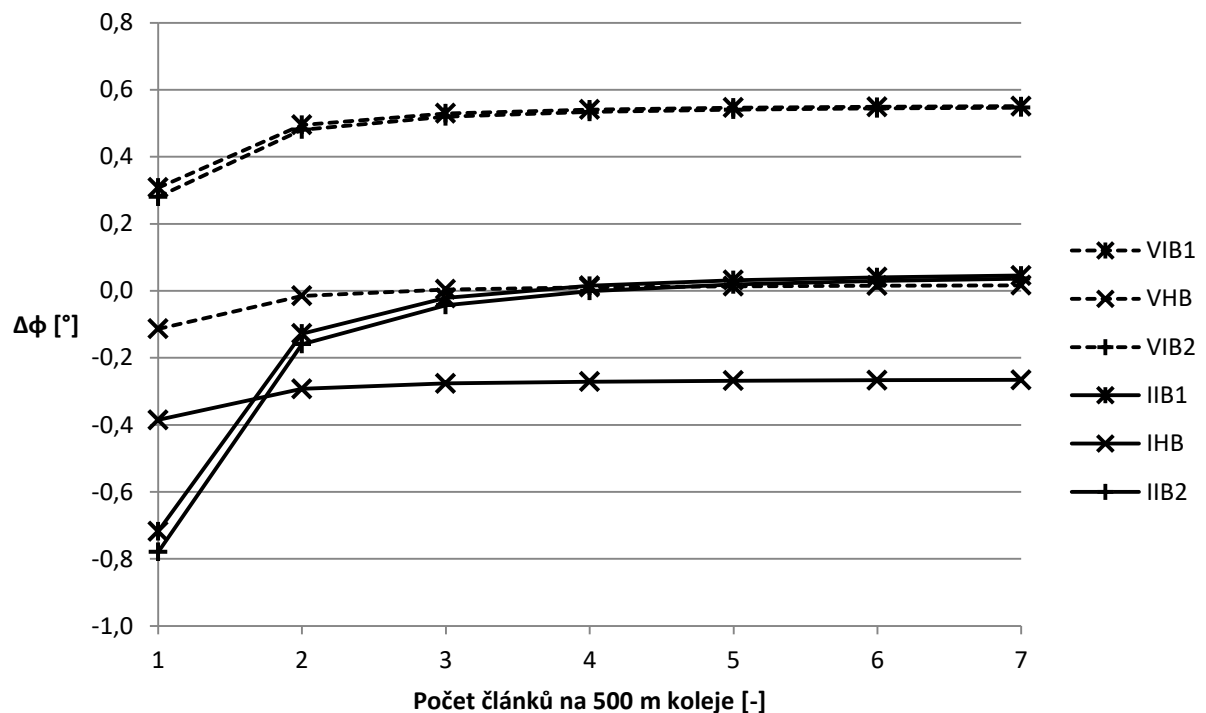
Pro ověření toho, že model Eku_cl byl správně sestaven a ostatní modely byly převzaty bez chyb, bylo třeba provést analýzu volného stavu s tímto modelem a srovnat ji s předchozími analýzami provedenými docentem Hospodkou. Všechny transformátory a tlumivky jsou dokonale uzemněné, tedy odpor mezi středem primárního vinutí a zemí je $R_i = 0 \Omega$. Jelikož je ale ve volném a šuntovém stavu obvod symetrický vůči zemi, do země netečou žádné proudy, a odpor uzemnění nemá vliv na výsledky těchto analýz.

Byla provedena řada analýz, ve kterých se postupně zvyšoval počet článků na 500 m délky koleje (N v grafu, který ukazuje Obrázek 3.5-3) z 1 až na 7. Pro ověření správnosti postupu při návrhu modelu kolejového úseku Eku bylo sledováno, jestli se hodnoty napětí a proudů v hlavním a informačních bodech blíží k hodnotám získaným na dvojbranovém modelu v [13]. Získané výsledky pro nejpřesnější model, tedy se sedmi články na 500 m koleje, uvádí Tabulka 5.1-1. Tato tabulka také pro srovnání uvádí výsledky analýzy v [13] s použitím dvojbranového modelu (se svodovou admitancí mezi kolejemi $Y = 0,5 \text{ S}$). Grafické zpracování závislosti chyby oproti [13], které bylo získáno s pomocí dvojbranového modelu, na jemnosti článkového modelu ukazují Obrázek 5.1-1 a Obrázek 5.1-2 [13].

Tabulka 5.1-1: Výsledky analýzy volného stavu pro $Y_p = 0,5 S$ [13]

	moje výsledky		výsledky z [13]		rozdíl amplitud [%]	rozdíl fází [°]
	Amplituda	Fáze [°]	Amplituda	Fáze [°]		
VIB1 [V]	1,2341	-105,55	1,23	-105	0,332786	0,550774
VHB [V]	3,6300	-102,02	3,63	-102	0,000507	0,016435
VIB2 [V]	1,2341	-105,55	1,23	-105	0,329625	0,546648
IIB1 [A]	0,7550	-61,05	0,76	-61	0,66424	0,045373
IHB [A]	5,4404	-153,73	5,44	-154	0,007586	0,26615
IIB2 [A]	0,7545	-61,04	0,76	-61	0,717905	0,036292

Obrázek 5.1-1: Relativní chyba amplitudy δx sledovaných veličin oproti výsledkům s dvojbranovými modely dle [13] v závislosti na počtu článků na 500 m koleje (v procentech) pro $Y_p = 0,5 S$



Obrázek 5.1-2: Chyba fáze $\Delta\varphi$ sledovaných veličin oproti výsledkům s dvojbranovými modely dle [13] v závislosti na počtu článků na 500 m koleje (ve stupních) pro $Y_p = 0,5 S$

Na grafech je vidět, že už při počtu článků 3 a větším je chyba menší než 1 % a 0,5 °, respektive. Navíc jsou ve zprávě doc. Hospodky uvedené výsledky zaokrouhleny. Při pohledu do dat, která ukazuje Tabulka 5.1-1, je vidět, že všechny chyby, kromě amplitud proudů v informačních bodech a fází napětí v IB, lze přičíst na vrub právě zaokrouhlování. Další výpočty byly provedeny s počtem tří článků na 500 m koleje. Tento počet poskytuje dostatečnou přesnost výsledků potřebnou pro analýzy [13].

5.2 Analýza šuntového stavu NKO s dvoubodovým zakončením

Protože analýza VS vyšla stejně jako ve zprávách, se kterými byly výsledky srovnávány, byl čas pokročit k dalšímu kroku – analýze ŠS na článkovém modelu s dvoubodovým zakončením. Analýza spočívala v postupném vkládání rezistence šuntu $R_s = 0,1 \Omega$ do obvodu. Šunt byl vkládán mezi uzly na pravé a levé kolejnici vždy po 500 metrech, tedy mezi jednotlivé podobvody EKV_cl. Šunt byl tedy vkládán vždy paralelně s tlumivkou SYT nebo s transformátorem DT 0,75. Číselné výsledky zde pro jejich rozsáhlost uvedeny nejsou. Grafické výsledky uvádí příloha 10.1. Lze je zhodnotit tak, že odpovídají výsledkům analýzy šuntového stavu, které provedl doc. Hospodka s dvojbranovým modelem. Bylo tedy možné postoupit k návrhu tříbodového zakončení KO a dále k analýze havarijního stavu [13].

5.3 Návrh tříbodového zakončení KO

Tato podkapitola se zabývá návrhem tříbodového zakončení pro analýzu HS. Model zakončení byl převzat, jak popisuje kapitola 3.9. Cílem analýz bylo získat hodnoty tohoto zakončení. Prve byla ověřena skutečnost, že proud středy transformátorů konverguje k určité koncové hodnotě, když je prodlužován modelovaný obvod. Dále byla ověřena skutečnost, že při prodlužování délky modelovaného úseku koleje s výstrojí vstupní impedance tohoto úseku klesá. Dále byly zjištěny hodnoty zakončovací impedance a zakončení bylo ověřeno srovnáním s původním dvoubodovým zakončením a analýzou VS.

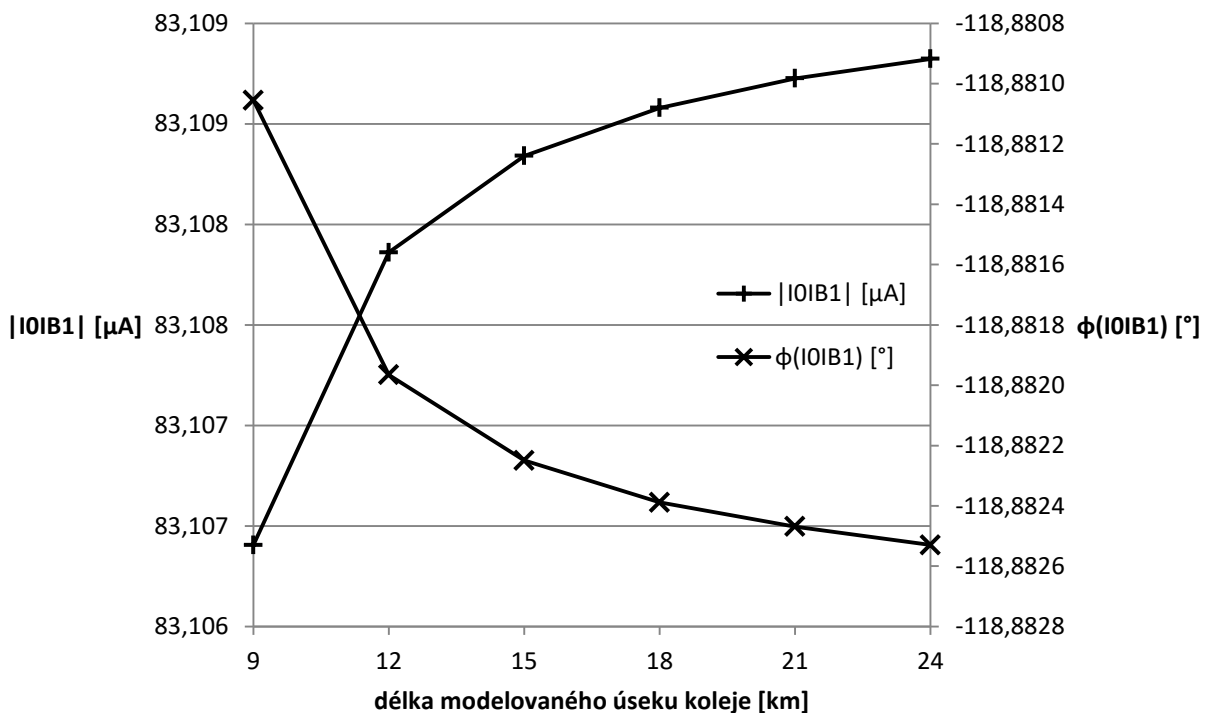


5.3.1 Ověření konvergence proudu

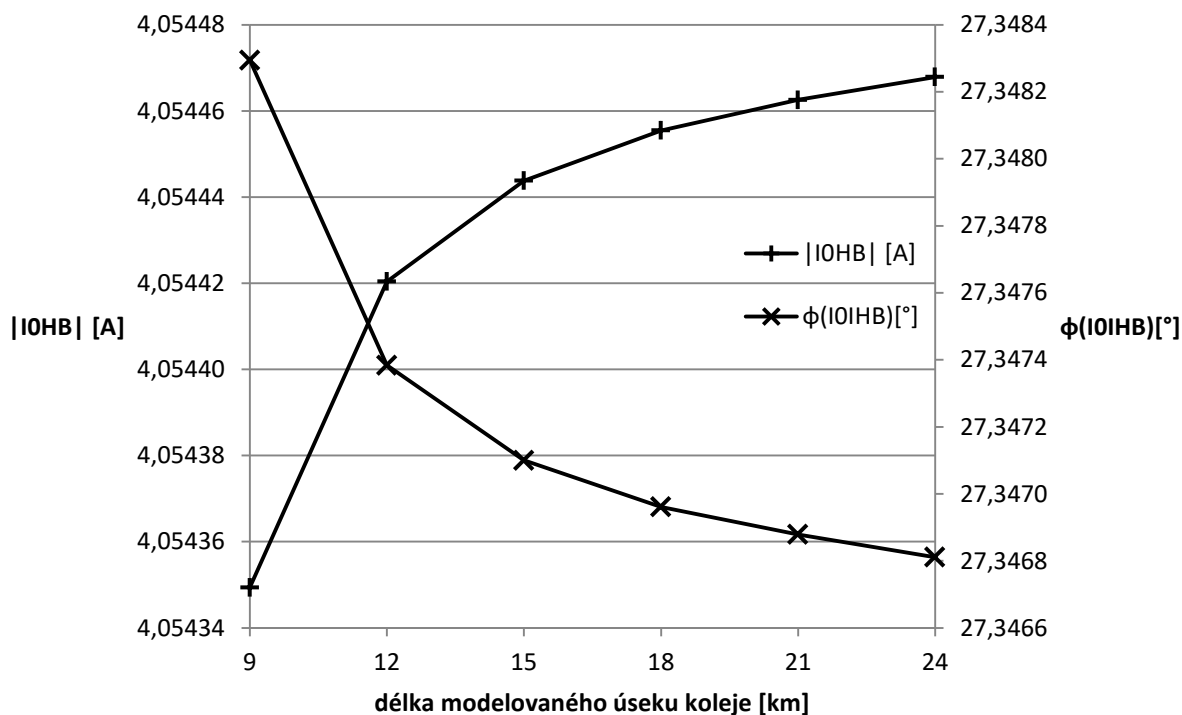
V této simulaci byl s úpravami použit model NKO ze simulace volného stavu. V polovině délky KO, hned napravo od připojení napáječe hlavního bodu, byl proveden lom kolejnice. Takto upravený model byl zprava postupně prodlužován 3 km dlouhými úseky koleje, které obsahují 1 HB a 1 IB. Tyto úseky byly vkládány mezi poslední EKU 3 a mezi dvoubodové zakončení. Napáječe v tomto prodloužení už ale operují na jiné frekvenci, a pro účely naší simulace se tedy chovají jen jako pasivní prvky, sekundární vinutí transformátorů DT 0,75 v tomto prodloužení jsou naprázdno. Byla sledována závislost proudů tekoucích středy stykových transformátorů do země na délce modelovaného kolejového obvodu. Tabulka 5.3-1 obsahuje výsledné proudy pro nejdelší analyzovaný obvod. Obrázek 5.3-1, Obrázek 5.3-2 a Obrázek 5.3-3 ukazují, jak se mění proud tekoucí do země středy napájecích transformátorů v závislosti na délce modelovaného úseku [14].

Tabulka 5.3-1: Proudů středy vinutí transformátorů pro $l = 24 \text{ km}$, $Y_p = 0,5 \text{ S}$, $R_i = 0 \Omega$

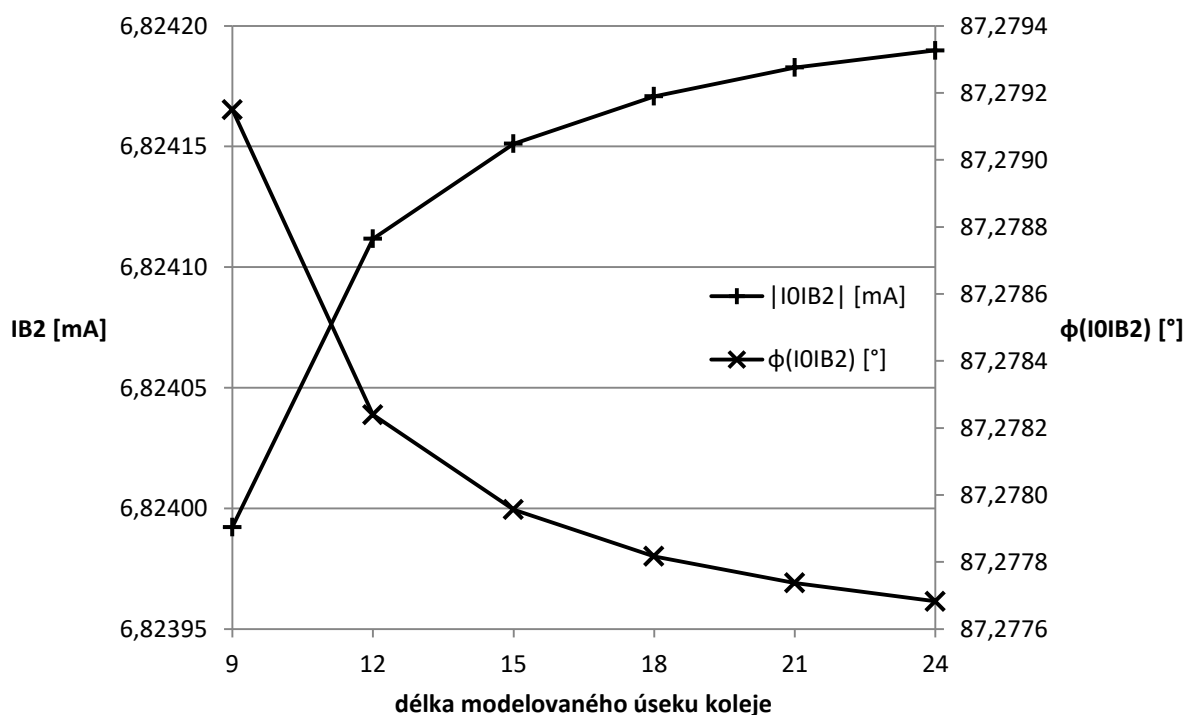
	Amplituda	ϕ [°]
Proud středem transformátoru v 1. Informačním bodu (IOIB1) [μA]	83,109	-118,88
Proud středem transformátoru v hlavním bodě (IOHB) [A]	4,054	27,35
Proud středem transformátoru v 2. Informačním bodu (IOIB2) [mA]	6,824	87,28



Obrázek 5.3-1: Změna amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v prvním (levém) informačním bodě v závislosti na délce analyzovaného úseku pro $Y_p = 0,5 \text{ S}$, $R_i = 0 \Omega$



Obrázek 5.3-2: Změna amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v hlavním bodě v závislosti na délce analyzovaného úseku pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$



Obrázek 5.3-3: Změna amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v druhém (pravém) informačním bodě v závislosti na délce analyzovaného úseku pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$

Jak grafy ukazují, hodnoty proudů se pro analyzované délky KO neustálily. Je ale vidět, že změny jsou velice malé, a s prodlužujícím se KO se zmenšují. Rozdíly mezi výsledky pro 21 a 24 km jsou menší než 5 ppm. Je tedy ověřeno, že s prodlužujícím se KO se výsledky analýz HS zlepšují.



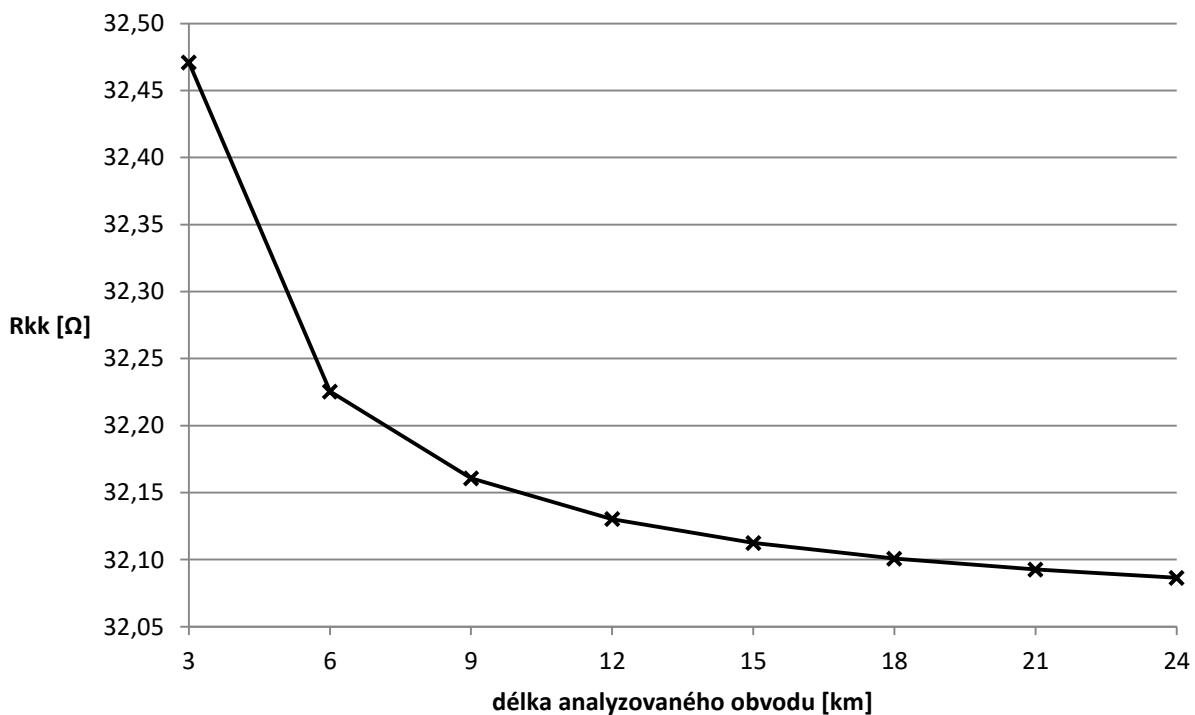
5.3.2 Ověření konvergence zakončovací impedance

V dalším kroku bylo ověřeno, že impedance kolejového úseku osazeného výstrojí (bez buzení) také konverguje. Byla vytvořena procedura, která generuje modely, jako ukazuje Obrázek 3.6-2 a to s libovolnou délkou. Z délky obvodu, při které už se vstupní impedance analyzovaného obvodu nemění, pak je možné usoudit, jak dlouhý obvod je třeba analyzovat pro zjištění impedance třibodového zakončení NKO. Obrázek 5.3-4 až Obrázek 5.3-7 ukazují, jak se vstupní rezistence a reaktance tohoto obvodu mění s délkou analyzovaného úseku, Tabulka 5.3-2 ukazuje výsledné hodnoty pro nejdelší analyzovaný úsek koleje změřené a vypočtené podle vztahů (13) a (14) z kapitoly 3.6.

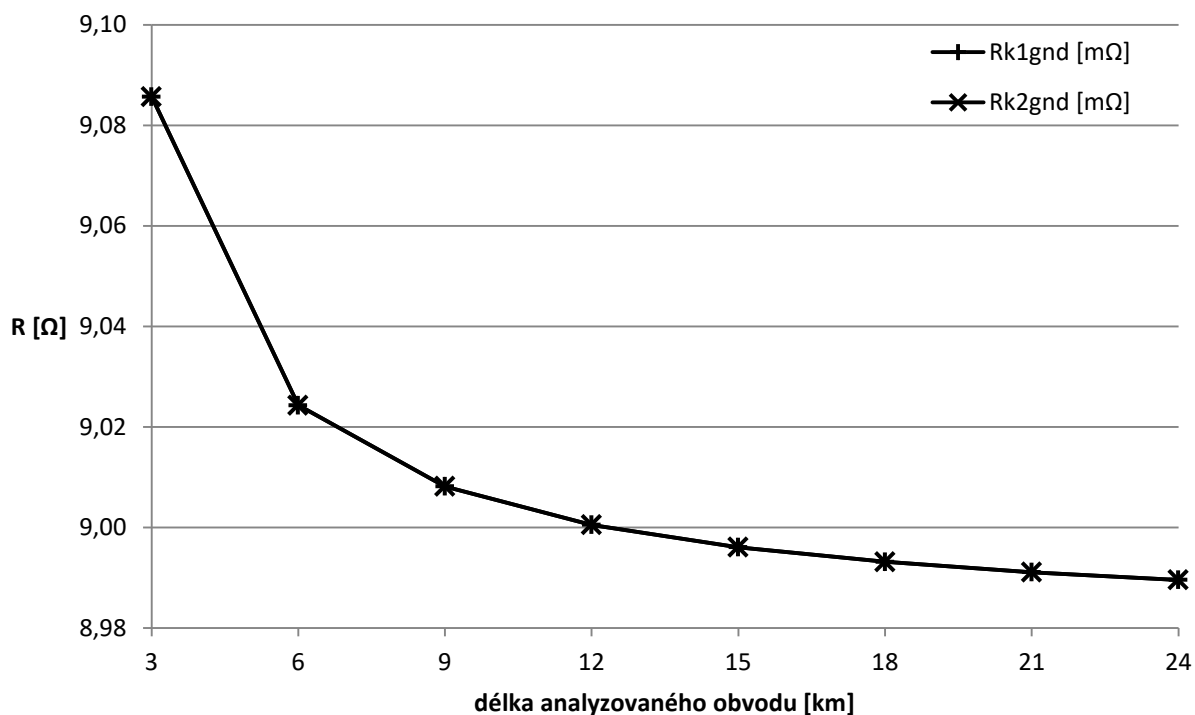
Tabulka 5.3-2: Výsledné odpory a induktance mezi kolejnicemi a zemí pro $l = 27$ km, $Y_p = 0,5$ S, $R_i = 0 \Omega$

Rkk [mΩ]	32,078
Rk1gnd [mΩ]	8,988
Rk2gnd [mΩ]	8,988
Xkk [mΩ]	188,608
Xk1gnd [mΩ]	48,025
Xk2gnd [mΩ]	48,025

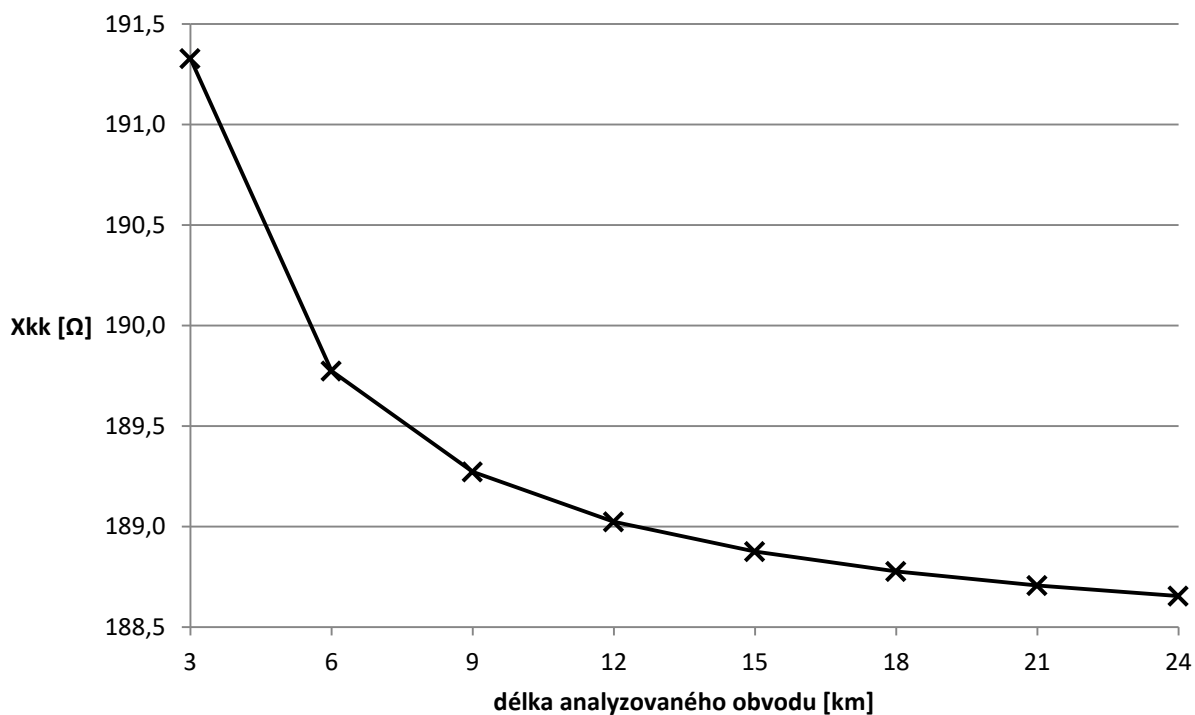
Jak obrázky ukazují, s prodlužujícím se analyzovaným obvodem, který ukazuje Obrázek 3.6-1, hodnoty zakončení konvergují k určitým hodnotám, ale i s použitím velmi dlouhých obvodů (a velmi výpočetně náročných analýz) se hodnoty zcela neustálily. Rozdíl mezi hodnotami pro 24 a 21 km je ale menší než 0,5 ‰. Proto lze považovat hodnotu zakončení pro 24 km dlouhý obvod jako dostatečně přesnou pro použití v analýze havarijního stavu. Dále bylo ověřeno, že impedance kolejnice-zem je stejná pro obě kolejnice, a v dalších analýzách už tedy stačí zjišťovat jen jednou, pro jednu kolejnici.



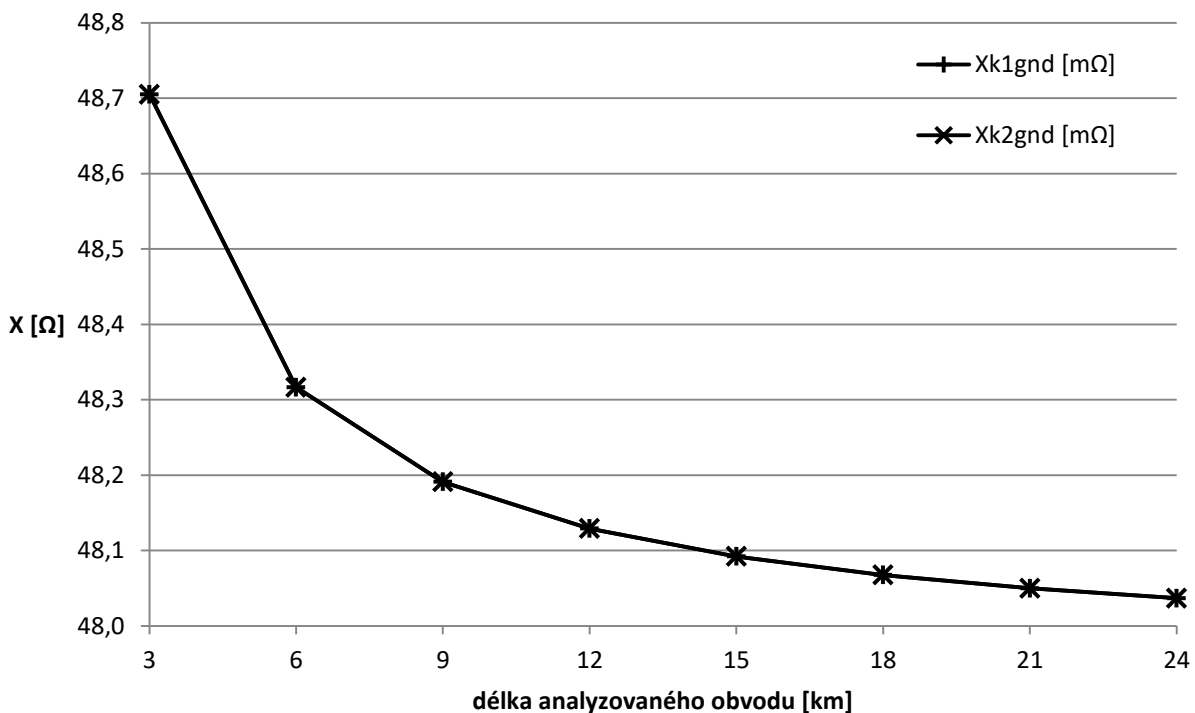
Obrázek 5.3-4: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5$ S, $R_i = 0 \Omega$



Obrázek 5.3-5: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$



Obrázek 5.3-6: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$



Obrázek 5.3-7: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$

5.3.3 Zjištění hodnot třibodového zakončení

Protože konvergence proudů a impedancí při prodlužování obvodu byly v předchozích podkapitolách ověřeny, bylo možné přistoupit ke zjištění hodnot třibodového zakončení obvodu. Byla vytvořena procedura, která nadefinuje hodnoty třibodového zakončení pro kolejový úsek o dané délce. Tato procedura používá stejný obvod, jako je popsán v předchozí podkapitole. Provádí ale pouze dvě analýzy, jednu pro zjištění impedance mezi kolejemi a druhou pro zjištění impedance mezi kolejí a zemí. Protože se v předchozí kapitole potvrdilo, že impedance mezi první kolejí a zemí je stejná jako impedance mezi druhou kolejí a zemí, stačí zjistit tuto impedanci jen jednou.

Postup při výpočtu hodnot zakončení popisuje kapitola 3.9. Hodnoty prvků, které pak budou použity pro třibodové zapojení při simulaci havarijního stavu, byly vypočteny podle rovnic (17) a (18). Tyto hodnoty uvádí Tabulka 5.3-3 [14].

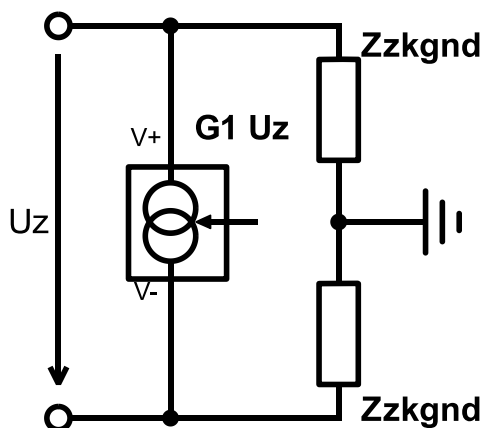
Tabulka 5.3-3: Hodnoty trojpólového zakončení NKO obrazovou impedancí pro $l = 27 km$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$

Rzkk [mΩ]	Rzkgnd [mΩ]	Lzkk [μH]	Lzkgnd [μH]
-4,0169	1,9359	-7,4276	3,7063

Je zářející, že hodnoty impedance mezi kolejemi vycházejí záporné. To z fyzikálního hlediska nedává smysl. Jako matematický model to ale poskytuje korektní výsledky. Důvodem, proč hodnoty vychází takto, může být, že tlumivky SYT i transformátory DT 0,75 mají velice malou impedanci kolej-zem, ale velkou impedanci kolej-kolej. Vzhledem k tomu, že cílem simulace je získat proudy a napětí uvnitř KO, není podstatné, jak moc přesný je model pro kolejiště mimo KO, stačí, když umožní přesné modelování v simulované části KO.

Zakončení by mohlo být modelováno i pomocí jiného obvodu. Například by impedance Z_{kk} mohla být nahrazena zdrojem proudu řízeným napětím mezi kolejemi U_z , jak ukazuje Obrázek 5.3-8. Toto

zakončení, pokud by transkonduktance G_1 (parametr řízeného zdroje proudu) byla komplexní (měla fázový posun), je duálním zapojením k zapojení, které ukazuje Obrázek 3.6-1. Použitá knihovna PraCAN ale nepřipouští zadání transkonduktance (parametru řízeného zdroje proudu) takové zdroje jako amplitudu a fázi. Transkonduktance by tedy musela být zadána jako komplexní číslo, čímž by bylo do výpočtu obvodu zavlečeno komplexní číslo a celý výpočet by se zpomalil. Proto je z hlediska délky výpočtu lepší zůstat u modelu, který ukazuje Obrázek 3.6-1.



Obrázek 5.3-8: Alternativní 3b zakončení se zdrojem proudu řízeným napětím

5.3.4 Ověření hodnot trojbodového zakončení

Aby bylo možné přistoupit k analýze havarijního stavu, bylo třeba ověřit správnost hodnot získaných pro 3b zakončení. Byla spočtena ekvivalentní impedance mezi kolejemi (pro třibodové zakončení) ve volném stavu, a ta byla porovnaná s impedancí dvoubodového ukončení. Liší se o méně než 0,5 % v modulu a o méně než 0,15 % ve fázi. Dále byla provedena simulace volného stavu s použitím trojbodového zakončení a s použitím třech článků na 500 m kolejového úseku a výsledky byly porovnány s odpovídající simulací s dvoubodovým zakončením. Analyzovaný obvod odpovídal obvodu na Obrázek 3.9-1 s tím rozdílem, že neobsahoval lom koleje. Porovnání výsledku těchto simulací uvádí Tabulka 5.3-4. Veličiny jsou značeny stejně, jako ukazuje Obrázek 3.7-1. Rozdíl napětí a proudů v napáječích je nanejvýše v desetinách promile, proto lze prohlásit nahrazení zakončení za přesné.

Tabulka 5.3-4: Porovnání výsledků analýzy VS s dvoubodovým a třibodovým zakončením pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$

	Amplituda		fáze [°]		rozdíl mezi zakončeními [ppm]	
	2b	3b	2b	3b	Amp.	Fáze
VIB1 [V]	1,2340	1,2338	-105,53	-105,53	110,266	42,991
VHB [V]	3,6316	3,6316	-102,00	-102,00	8,866	3,116
VIB2 [V]	1,2339	1,2337	-105,52	-105,52	107,102	43,925
IIB1 [A]	0,7531	0,7530	-60,98	-61,03	73,345	913,280
IHB [A]	5,4326	5,4328	-153,72	-153,72	30,622	0,341
IIB2 [A]	0,7521	0,7521	-60,96	-61,01	49,576	905,722

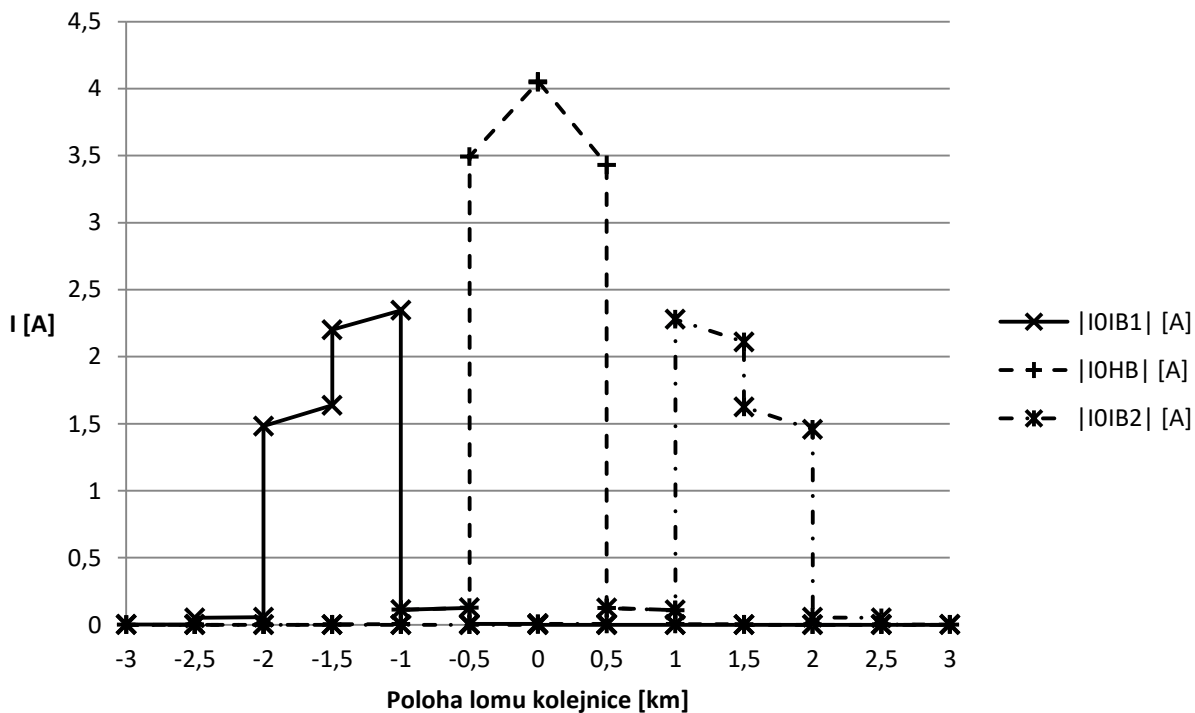
5.4 Analýza havarijního stavu

Když byl sestaven modelový obvod se správnou konfigurací a se správnými parametry všech prvků, bylo možné přistoupit k vlastní analýze havarijního stavu. Byl použit stejný obvod jako pro simulaci volného stavu, pro jehož zakončení bylo použito třibodové zakončení s hodnotami zjištěnými v předchozí kapitole. Tento obvod ukazuje Obrázek 3.9-1. Díky tomu, že se v proměnné typu string, která obsahuje netlist obvodu, periodicky opakují definice jednotlivých prvků a úseky kolejiště, je možné vytvořit cyklus,

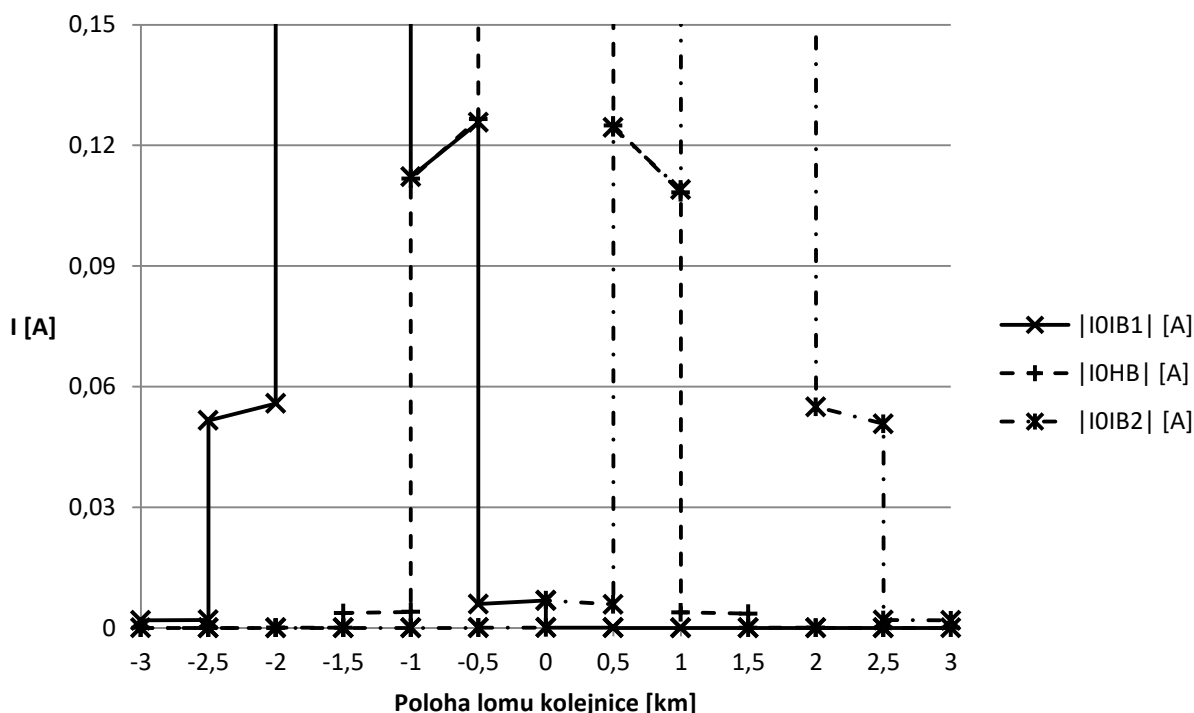


který vždy před název vybraného uzlu vloží „x“. Změní tím tak připojení podobvodu EKV_cl například z připojení do uzlu 13 na připojení do uzlu x13. Tím se tento podobvod od uzlu 13 odpojí, a lze tak simulovat lom kolejnice v uzlu 13. Autor vytvořil tento cyklus, a v něm byl vytvořen seznam netlistů pro všechny lomy kolejnic. V každém připojení výstroje (SYT, DT 0,75), záleží na tom, jestli dojde k lomu kolejnice napravo, nebo nalevo od připojení výstroje. Proto byl lom simulován v každém místě dvakrát, a to pro lom napravo a pro lom nalevo od místa připojení výstroje. Číselné výsledky této analýzy zde nejsou pro svou rozsáhlost uvedeny. Průběhy proudů ukazují Obrázek 5.4-1 a Obrázek 5.4-3.

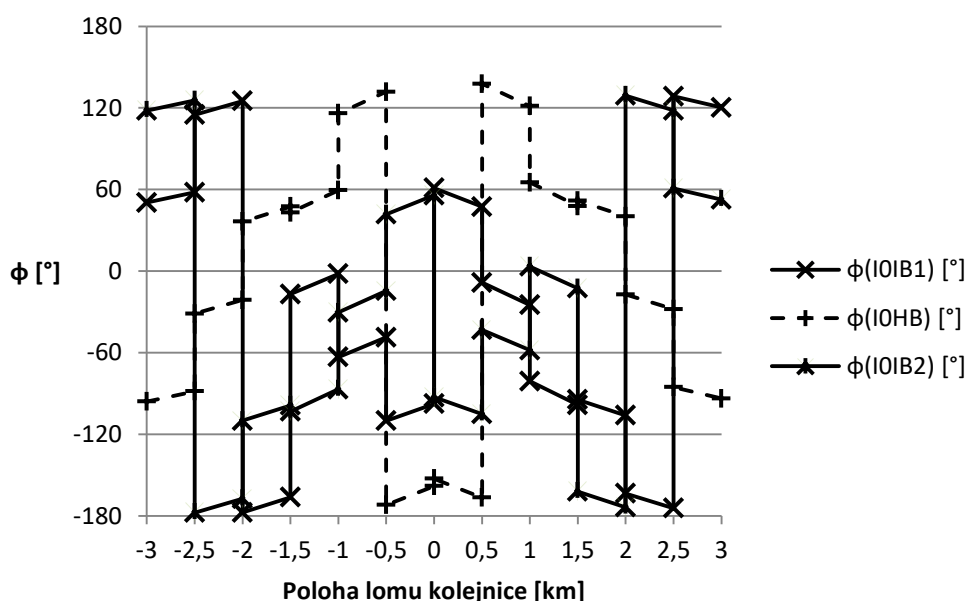
Z prvního z nich vyplývá, že amplitudy proudů středy transformátorů DT 0,75 jsou dobrými indikátory lomu kolejnice. Při lomu kolejnice na většině kolejového úseku dosahuje vždy jeden z nich hodnoty alespoň 1,5 A. Horší situace nastane při lomu v úsecích 0,5 až 1 km, a to na každé straně KO. Zde se lom nachází mezi dvěma tlumivkami SYT a signální proud ho obchází skrze středy těchto tlumivek, a středy transformátorů protéká pouze jeho zlomek. V analýze vychází nejnižší hodnota proudu skrze středy transformátorů v souřadnici 1 km, kde tento proud dosahuje přibližně 108 mA. Obrázek 5.4-2 lépe ukazuje průběhy proudů, které jsou menší než 150 mA. Je otázka, zda lze v provozu tak malé proudy bezpečně detekovat, či zda je třeba přistoupit k měření proudu středy tlumivek SYT, k redukci počtu tlumivek na maximálně jednu tlumivku mezi dvěma transformátory, či k jiným opatřením.



Obrázek 5.4-1: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$



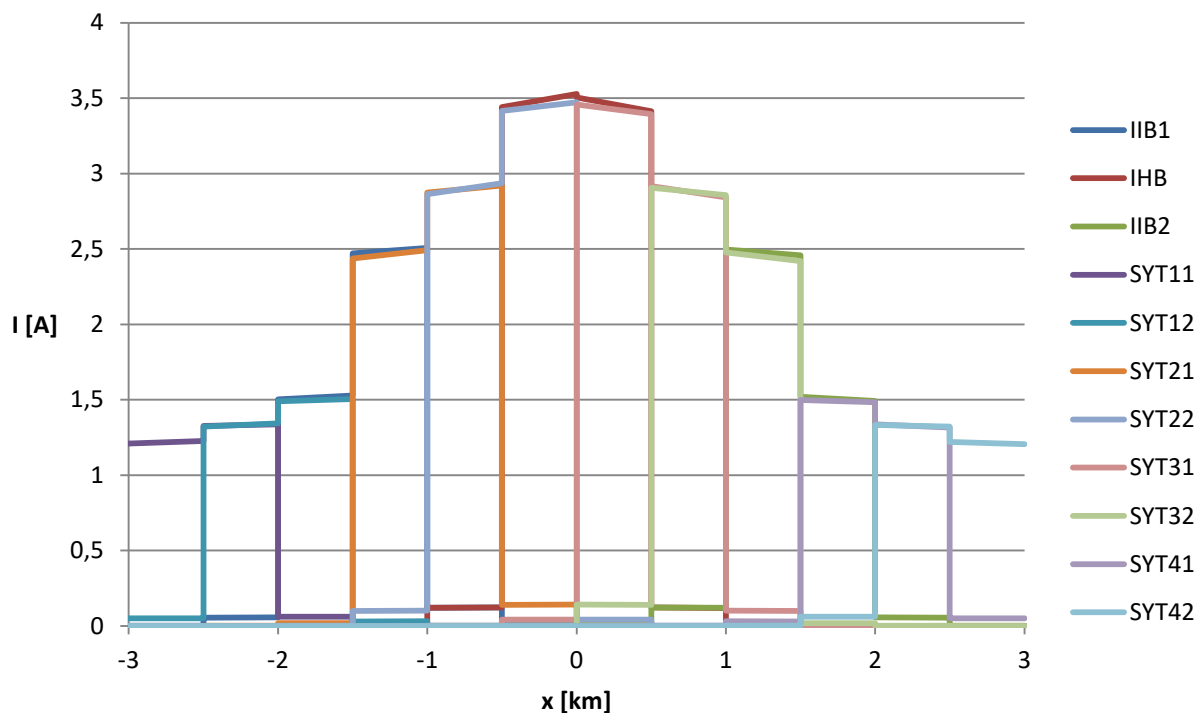
Obrázek 5.4-2: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$ – detailní pohled na proudy do 150 mA



Obrázek 5.4-3: Závislost fází proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$

5.4.1 Proudů tlumivkami v analýze havarijního stavu

Jako jedna z možností detekce havarijního stavu bylo na konci předchozí kapitoly označeno snímání proudů středním vývodem tlumivek SYT. Aby byla ověřena skutečnost, že tímto vývodem opravdu tečou detekovatelné proudy, byla provedena stejná analýza jako v kapitole 5.4 ještě jednou, ale navíc byly zaznamenány průběhy proudů středy tlumivek SYT. Průběhy absolutních hodnot proudů středy všech transformátorů a tlumivek ukazuje Obrázek 5.4-4.



Obrázek 5.4-4: Průběhy absolutních hodnot proudů středy všech transformátorů a tlumivek v NKO při havarijním stavu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 0 \Omega$. První číslo v názvu tlumivky značí pořadí zleva úseku EKU3 ve kterém se nachází, druhé číslo značí pořadí zleva tlumivky v daném úseku.

Jak je z obrázku vidět, pokud budou měřeny proudy středy tlumivek, dosahuje pro tuto variantu analýzy minimální proud, který je potřeba detekovat, velikosti necelých 2,5 A. Navíc je vidět, že každý střed svým proudem na grafu „pokryje“ úsek dlouhý 1 km. Pro „pokrytí“ úseků, mezi tlumivkami SYT by tak stačilo měřit proud vždy jen u jedné z dvojice.

5.5 Analýza havarijního stavu s odporem uzemnění $R_i = 10 \Omega$

V další analýze byla provedena varianta analýzy HS s tím, že všechna výstroj (transformátory a tlumivky) byla uzemněna přes rezistenci $R_i = 10 \Omega$. Aby byla analýza přesná, bylo třeba znovu zjistit hodnoty pro třibodové zakončení. Nejprve byl znovu ověřen předpoklad, že se proud středy transformátorů s prodlužováním analyzovaného obvodu ustálí na určité „limitní“ hodnotě. Dále bylo třeba ověřit, že i impedance mezi kolejnicemi navzájem a mezi kolejnicemi a zemí se s prodlužováním analyzovaného úseku koleje ustálí na určité konečné hodnotě. Poté už bylo možné zjistit hodnoty třibodového zakončení KO s odporem uzemnění a ověřit je vůči dvoubodovému zakončení. Nakonec byla provedena analýza havarijního stavu s odporem uzemnění.

5.5.1 Ověření konvergence proudu pro $R_i = 10 \Omega$

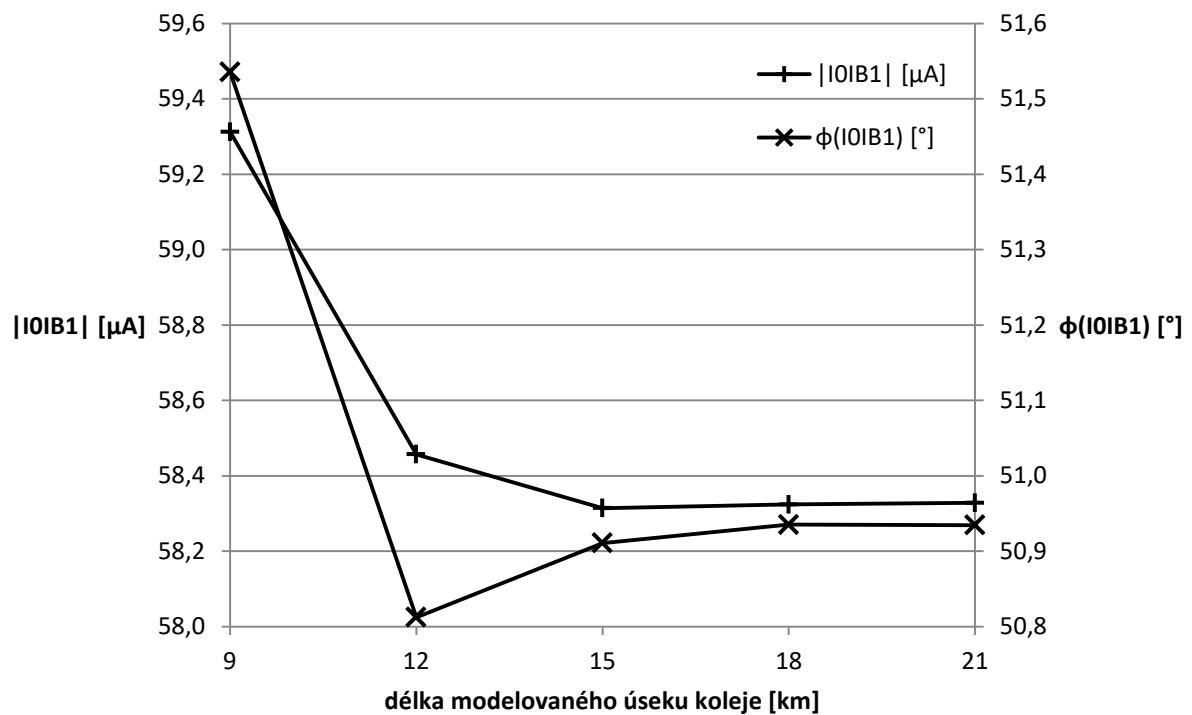
Tato analýza byla provedena stejně jako v kapitole 5.3.1 s tím rozdílem, že všechna výstroj (transformátory, tlumivky) byla uzemněna přes rezistenci 10Ω . Výsledné hodnoty proudů ukazuje Tabulka 5.5-1.



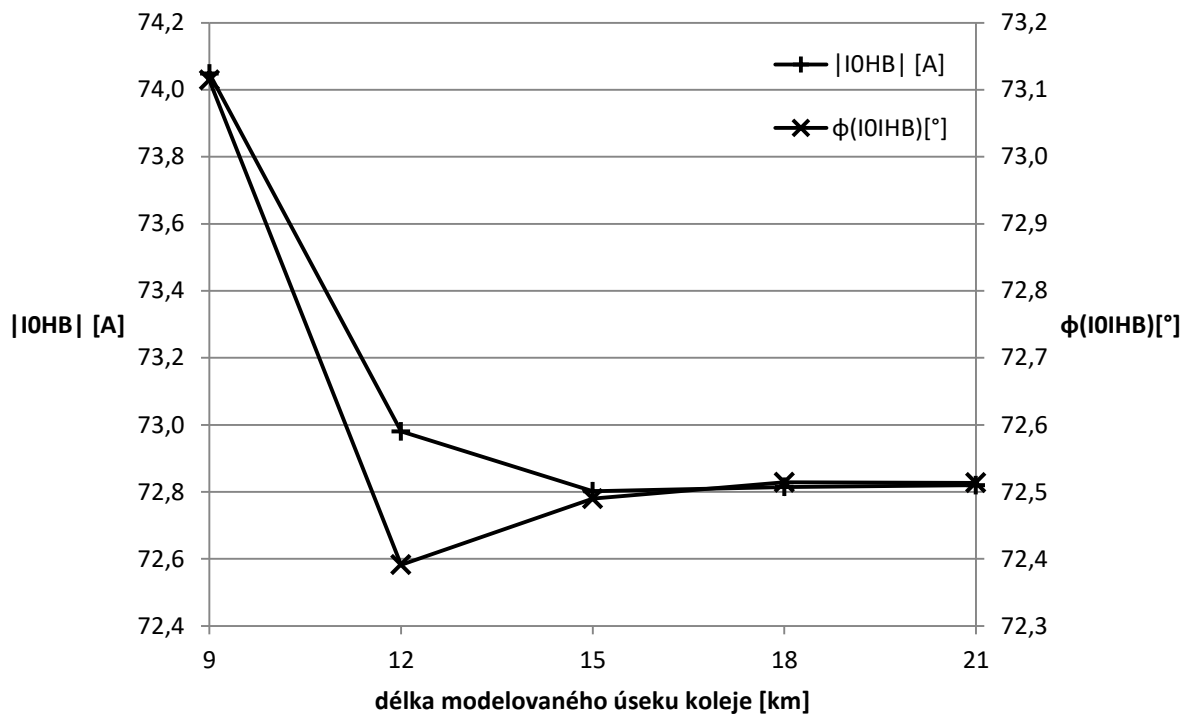
Tabulka 5.5-1: Výsledné hodnoty proudů středy transformátorů DT075 pro ověření konvergence proudů při prodlužování analyzovaného obvodu pro $l = 21\text{km}$, $Y_p = 0,5\text{ S}$, $R_i = 10\ \Omega$

	Amplituda [mA]	ϕ [°]
I0IB1	58,33	50,93
I0HB	72,82	72,51
I0IB2	43,87	-110,00

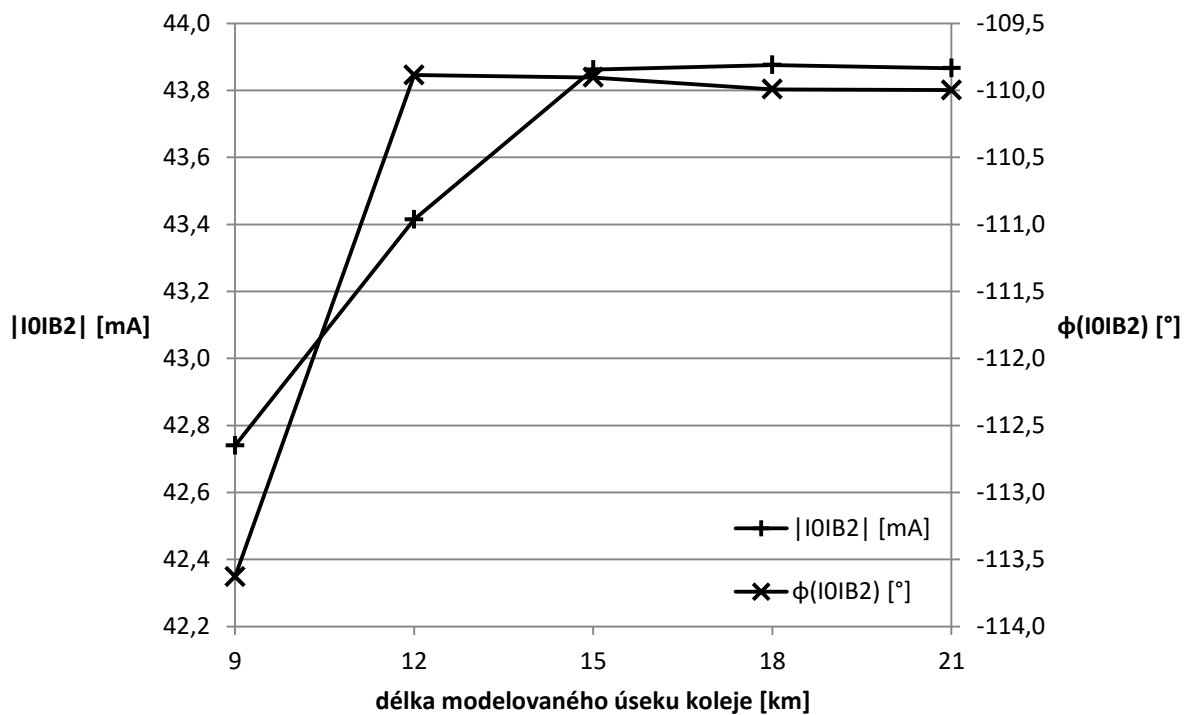
Obrázek 5.5-1 až Obrázek 5.5-3 ukazují závislosti amplitud a fází proudů tekoucích středy transformátorů na délce analyzovaného obvodu. Z grafů je vidět, že při délce obvodu 18 km se hodnoty ustálí a oproti délce 21 km už se skoro nemění. Rozdíl mezi hodnotami pro 18 a 21 km jsou menší než 1 %. Je tedy možné postoupit k ověření konvergence impedance.



Obrázek 5.5-1: Závislost amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v 1. informačním bodě na délce analyzovaného obvodu pro $Y_p = 0,5\text{ S}$, $R_i = 10\ \Omega$



Obrázek 5.5-2: Závislost amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v hlavním bodě na délce analyzovaného obvodu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$



Obrázek 5.5-3: Závislost amplitudy a fáze proudu středem transformátoru v 2. informačním bodě na délce analyzovaného obvodu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$



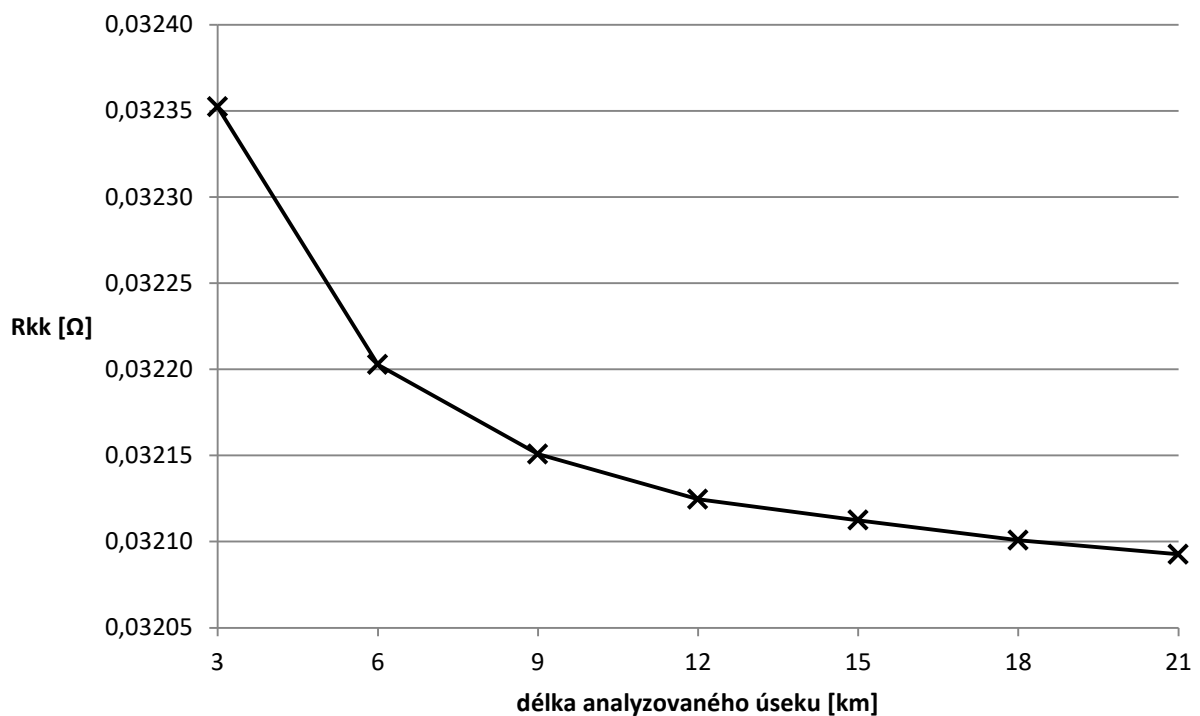
5.5.2 Ověření konvergence zakončovací impedance pro $R_i = 10 \Omega$

Tato analýza byla provedena stejně jako v kapitole 5.3.2 s tím rozdílem, že všechna výstroj (transformátory, tlumivky) byla uzemněna přes rezistenci 10Ω . Výsledné hodnoty rezistencí a reaktancí ukazuje Tabulka 5.5-2.

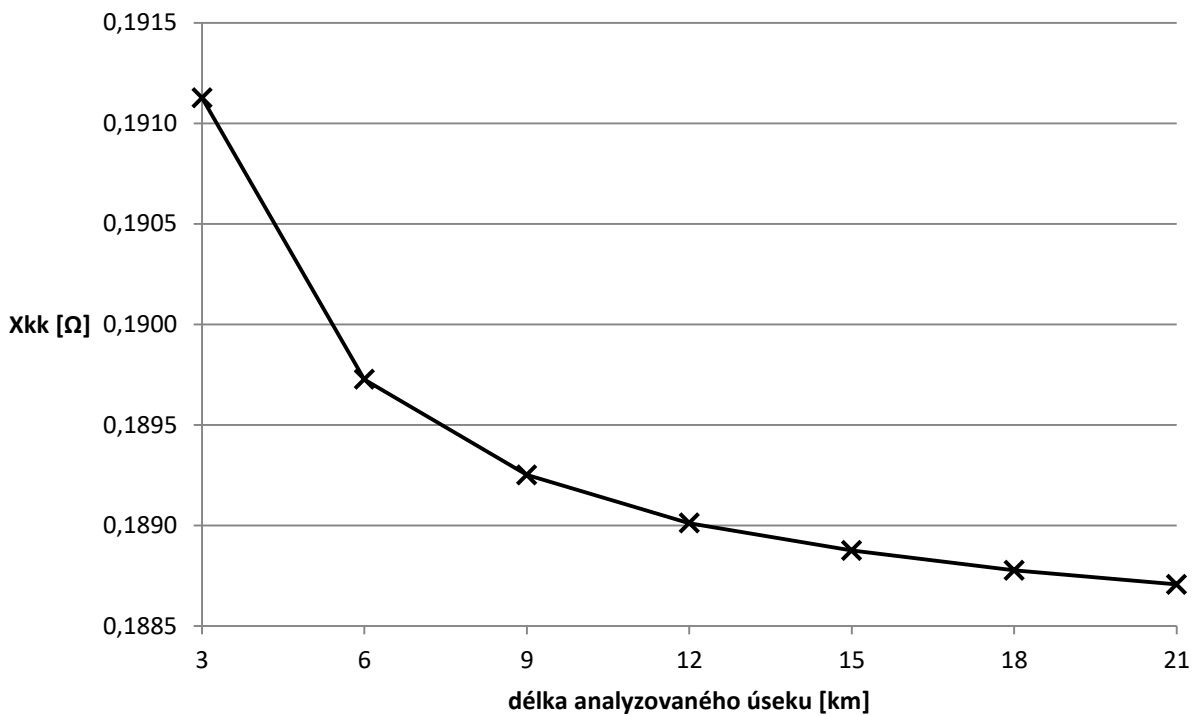
Tabulka 5.5-2: Výsledná rezistence a reaktance mezi kolejnicemi a mezi kolejnicemi a zemí pro délku KO 21 km

Rkk [Ω]	0,03209
Rk1gnd [Ω]	0,45269
Rk2gnd [Ω]	0,45269
Xkk [Ω]	0,18871
Xk1gnd [Ω]	0,33937
Xk2gnd [Ω]	0,33937

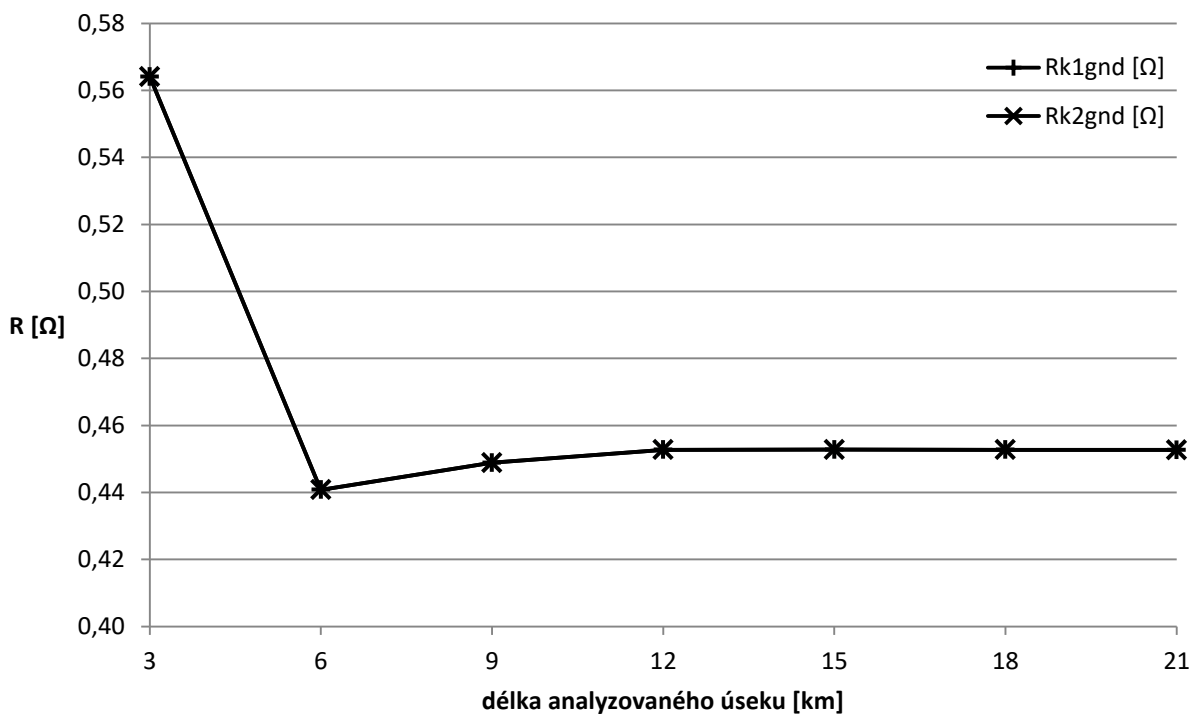
Obrázky značené Obrázek 10.1-4 až Obrázek 5.5-7 ukazují závislost rezistencí a reaktancí mezi kolejnicemi a mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje. Je vidět, že impedance mezi kolejemi (Rkk a Xkk) se ještě vyvíjí. Změny jsou ale tak malé – menší než 0,5 % - že už nemá smysl provádět další analýzy. Mohou být získány hodnoty zakončovacích prvků z obvodu délky 21 km.



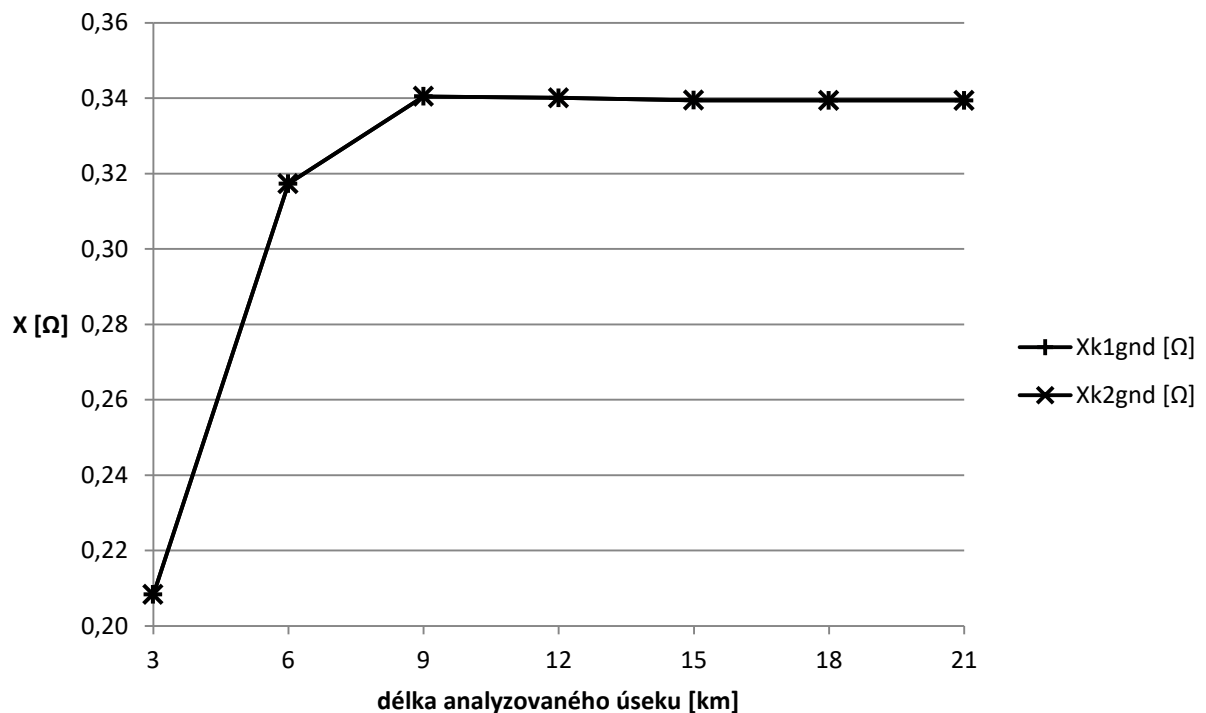
Obrázek 5.5-4: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$



Obrázek 5.5-5: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$



Obrázek 5.5-6: Závislost vstupní rezistence mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$



Obrázek 5.5-7: Závislost vstupní reaktance mezi kolejnicemi a zemí na délce analyzovaného úseku koleje pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$

5.5.3 Zjištění hodnot tříbodového zakončení pro NKO pro $R_i = 10 \Omega$

V prvním kroku je třeba ověřit, stále s dvoubodovým zakončením, že při prodlužování simulované délky KO konvergují proudy tekoucí do země k určité limitní hodnotě. To řeší následující podkapitola [14].

Tato analýza byla provedena stejně jako v kapitole 5.3.3 s tím rozdílem, že všechna výstroj (transformátory, tlumivky) byla uzemněna přes rezistenci 10Ω . Výsledné hodnoty zakončení ukazuje Tabulka 5.5-3.

Tabulka 5.5-3: Hodnoty trojpólového zakončení NKO obrazovou impedancí pro $l = 21 \text{ km}$, $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$

Rzkk [mΩ]	Rzkgnd [mΩ]	Lzkk [μH]	Lzkgnd [mH]
20,009	889,35	430,343	1,243

Porovnáním s daty, které ukazuje Tabulka 5.3-3 je vidět, že přidáním odporu do uzemnění se (podle očekávání) zvedla impedance vůči zemi, a díky tomu už je impedance mezi kolejnicemi v kladných hodnotách. Tento model je tak i korektním fyzikálním modelem pro vstupní impedanci analyzovaného obvodu.

5.5.4 Ověření hodnot tříbodového zakončení pro NKO pro $R_i = 10 \Omega$

Toto ověření bylo provedeno stejně jako v kapitole 5.3.4 s tím rozdílem, že všechna výstroj (transformátory, tlumivky) byla uzemněna přes rezistenci 10Ω . Výsledné hodnoty zakončení ukazuje Tabulka 5.5-4.

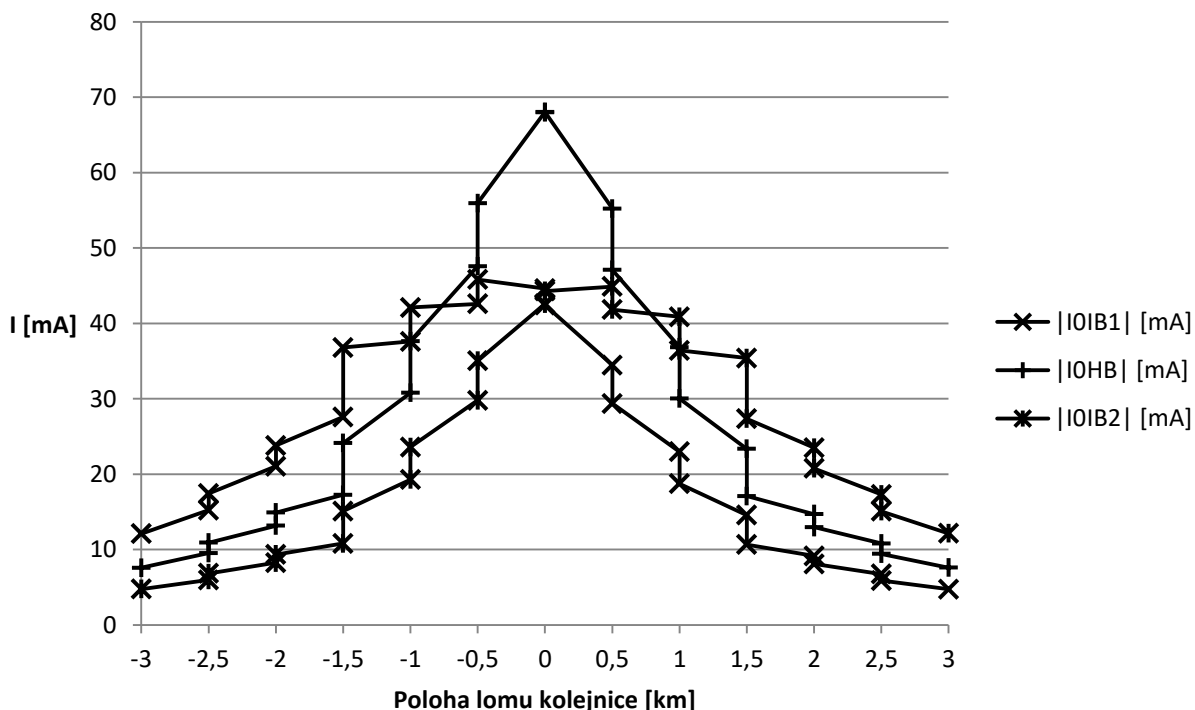
Tabulka 5.5-4: Porovnání výsledků analýzy VS s dvoubodovým a třibodovým zakončením pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$

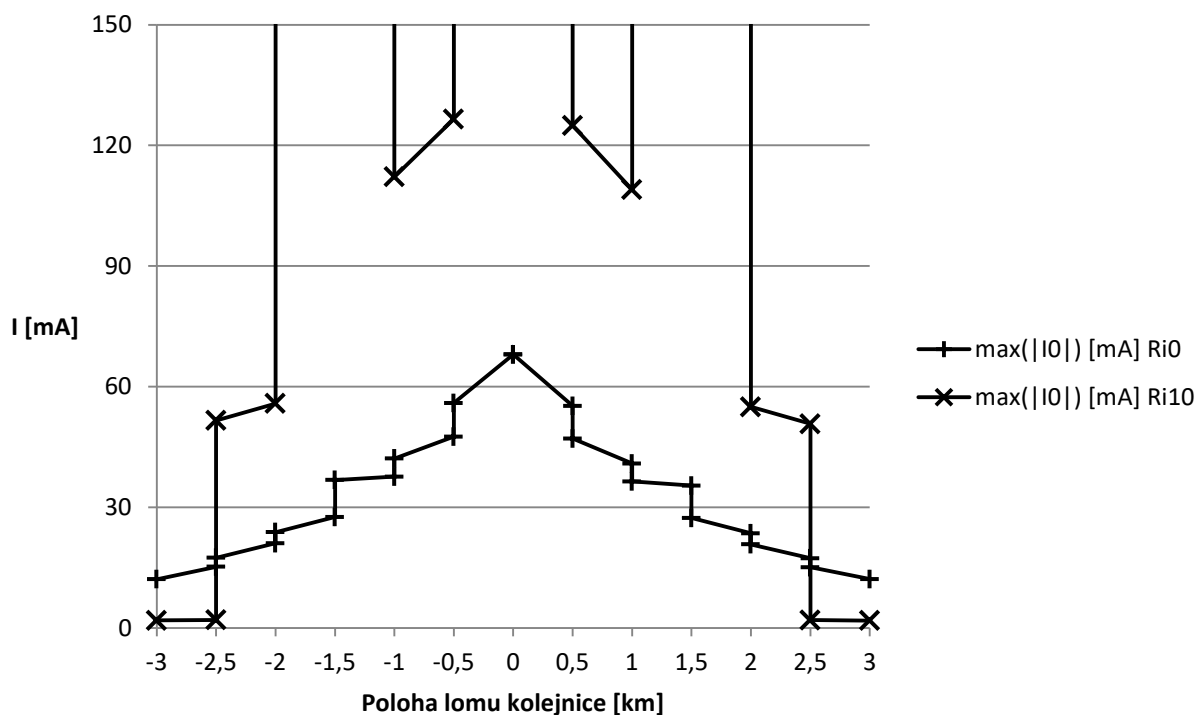
	Amplituda		fáze [°]		rozdíl mezi zakončeními [ppm]	
	2b	3b	2b	3b	Amplituda	Fáze
VIB1 [V]	1,2340	1,2339	-105,53	-105,53	87,668	43,668
VHB [V]	3,6316	3,6316	-102,00	-102,00	7,134	3,233
VIB2 [V]	1,2339	1,2338	-105,52	-105,52	84,733	44,302
IIB1 [A]	0,7531	0,7531	-60,98	-61,03	37,758	801,846
IHB [A]	5,4326	5,4328	-153,72	-153,72	26,741	0,897
IIB2 [A]	0,7521	0,7522	-60,96	-61,01	57,582	792,931

Porovnáním s daty, která obsahuje Tabulka 5.3-4, lze konstatovat, že chyby ve výsledcích analýzy volného stavu jsou v obou tabulkách srovnatelné velikosti.

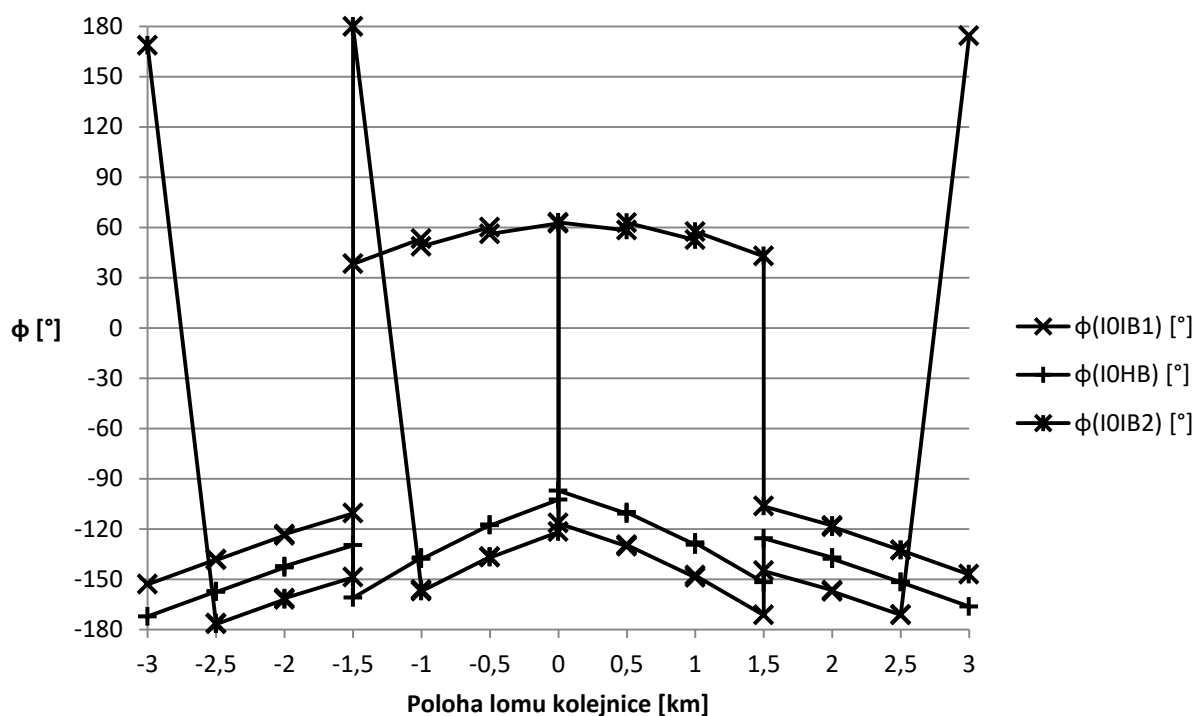
5.5.5 Analýza havarijního stavu pro $R_i = 10 \Omega$

Po přípravných analýzách z předchozích podkapitol je možné přistoupit k samotné analýze havarijního stavu. Tato analýza byla provedena stejně jako v kapitole 5.4, s tím rozdílem, že všechna výstroj (transformátory, tlumivky) byla uzemněna přes rezistenci 10Ω . Číselné výsledky pro svou rozsáhlost opět nejsou uvedeny, grafické zpracování výsledků ukazují Obrázek 5.5-8 až Obrázek 5.5-10.

Obrázek 5.5-8: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$



Obrázek 5.5-9: Závislost maxima amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$ a 0Ω – detail na proudy menší než 150 mA



Obrázek 5.5-10: Závislost fáze proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_p = 0,5 S$, $R_i = 10 \Omega$

Jak ukazují Obrázek 5.5-8 a Obrázek 5.5-9, na celé délce kolejového obvodu (souřadnice -1,5 km až 1,5 km) jsou proudy středy transformátorů mnohem menší, než jaké ukazuje Obrázek 5.4-1. Maximum pro proud v HB je pouze 68 mA, což je podstatně méně než nejmenší proud, který bylo třeba detekovat v kapitole 5.4, a který byl 108 mA. Zde je nejmenší proud, který je třeba detekovat pro bezpečnou detekci

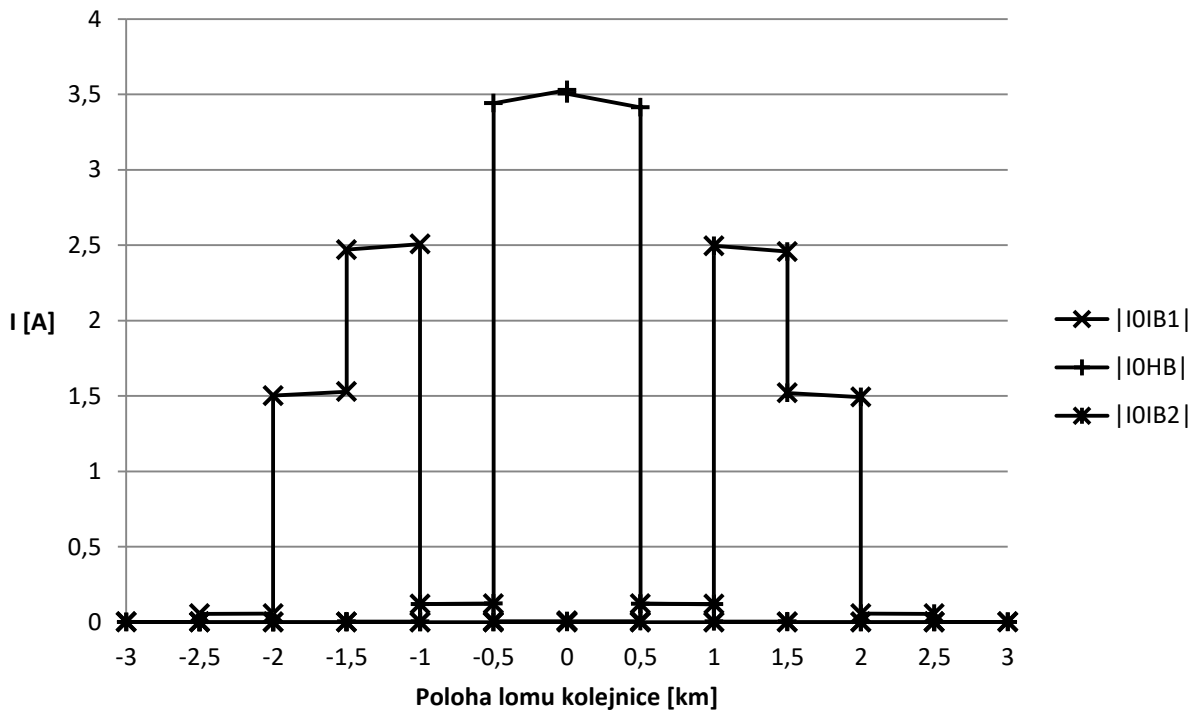


lomu kolejnice v rámci kolejového obvodu 35 mA, a nastává při lomu kolejnice hned u druhého informačního bodu.

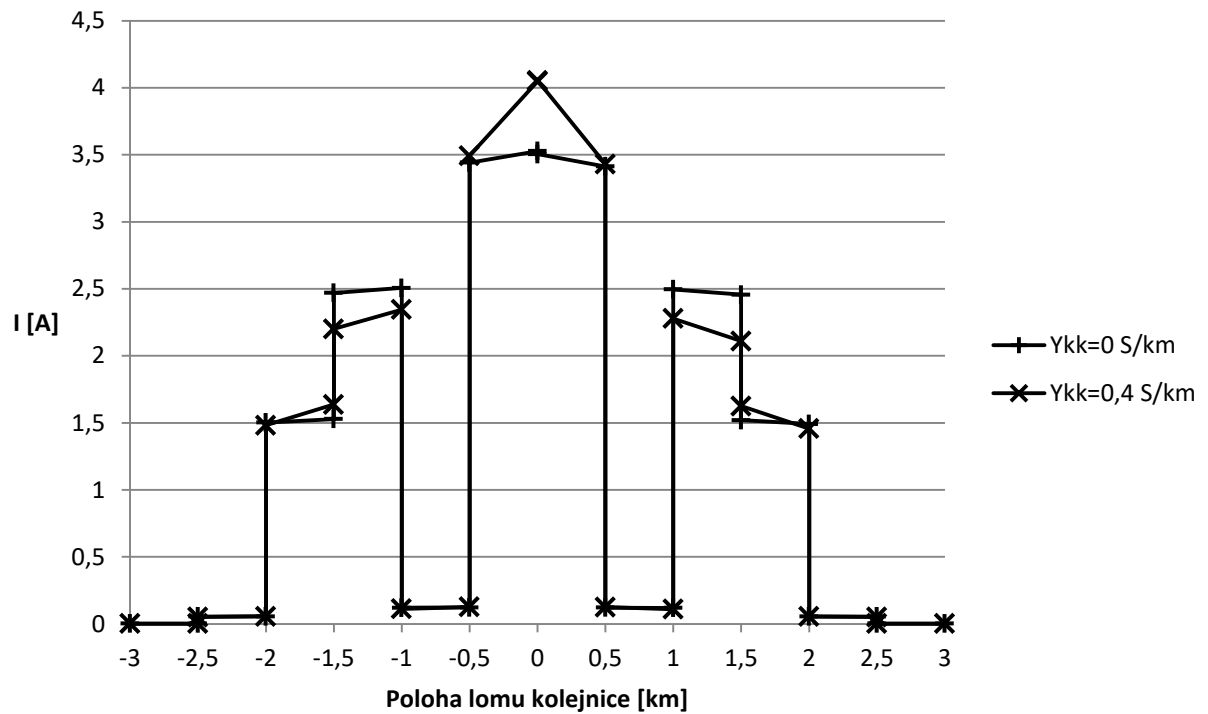
5.6 Analýza havarijního stavu s nulovým svodem přes pražce,

$$R_c \rightarrow \infty$$

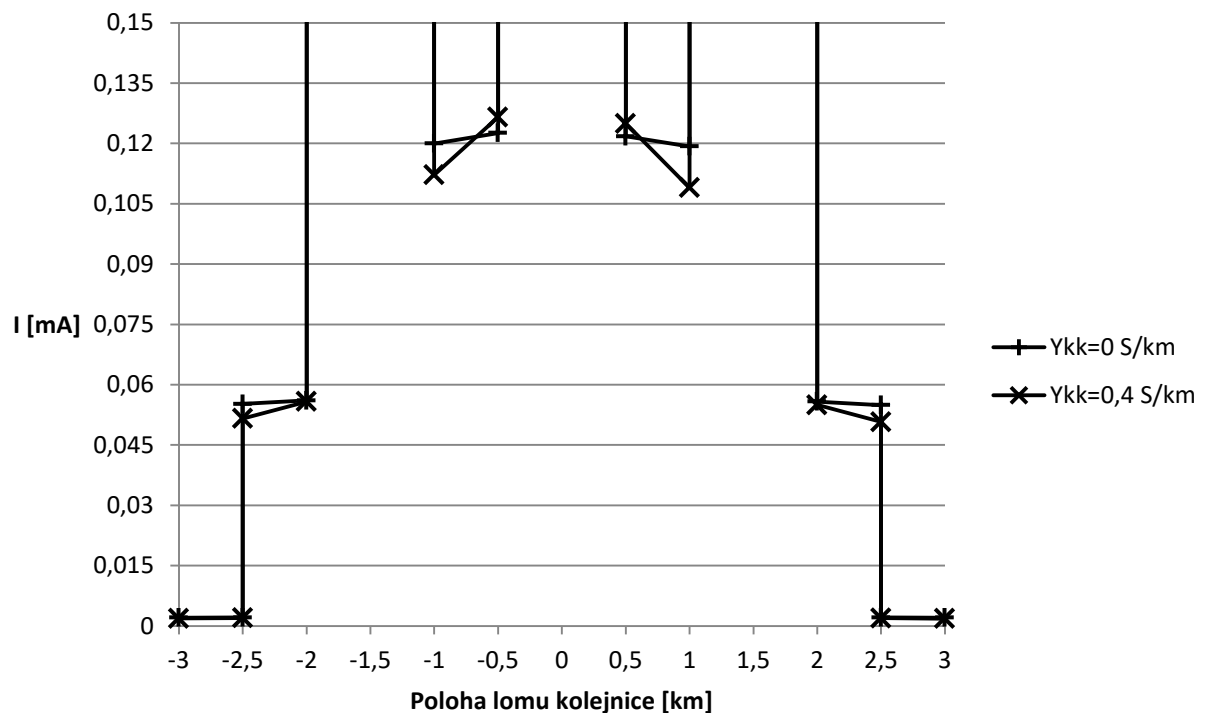
Pro zjištění toho, jaký vliv na havarijní stav má vodivost samotných pražců, byla provedena analýza havarijního stavu s nulovým odporem uzemnění do země $R_i = 0$ (jako v kapitole 5.4) a s tím, že svod skrze pražce je téměř nulový, tedy odpor R_c se blíží nekonečnu. Svod z každé kolejnice do země je ale stále uvažován, tedy odpory R_d a R_e mají stále stejnou hodnotu. Jinak byla tato analýza provedena stejně jako v kapitole 5.4, proto zde již nebude znova detailně popsán ani postup, ani dílčí výsledky. Obrázek 5.6-1 až Obrázek 5.6-4 ukazují výsledky analýzy. Jak ukazují Obrázek 5.6-2 a Obrázek 5.6-3, změna vodivosti v modelu má vliv na hodnoty proudů pro všechny lomy, které se vyskytnou uvnitř kolejového obvodu. Snížením svodu se hodnota nejmenšího proudu zvedne z přibližně 108 mA na přibližně 120 mA, což detekci lomu kolejnice usnadňuje.



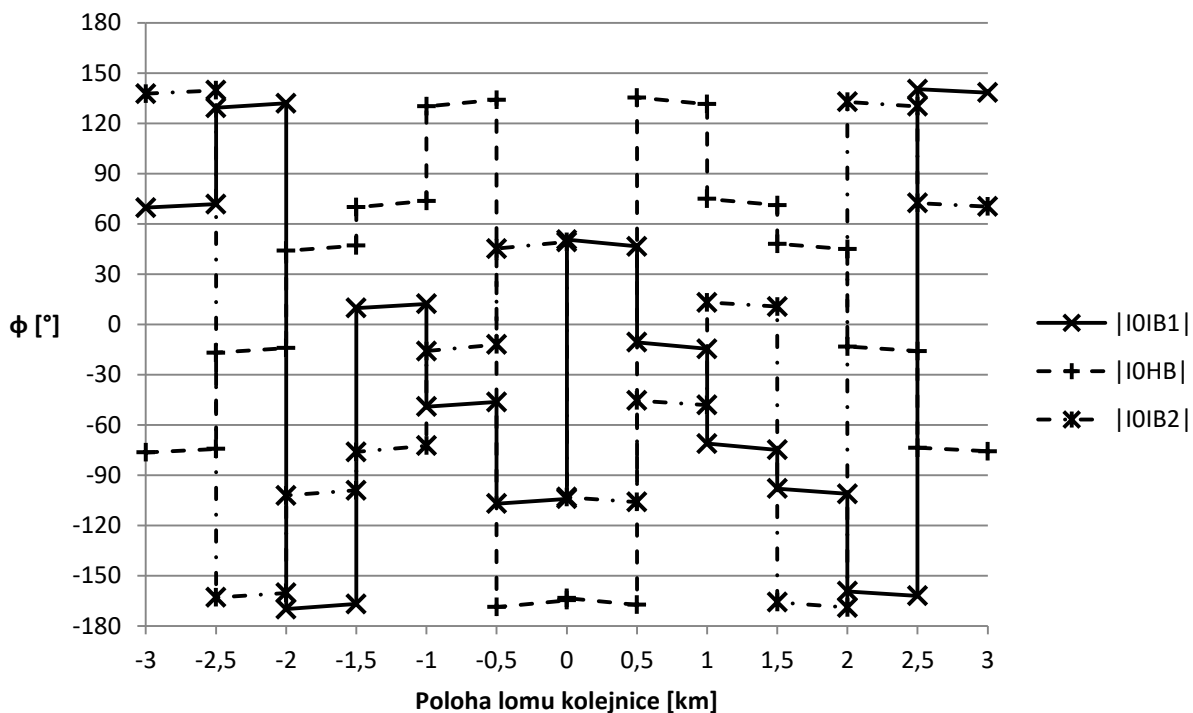
Obrázek 5.6-1: Závislost amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0 S$, $R_i = 0 \Omega$



Obrázek 5.6-2: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0$ S, $R_i = 0$ Ω a $Y_{kk} = 0,4$ S (odpovídá původnímu svodu skrz pražce), $R_i = 0$ Ω



Obrázek 5.6-3: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0$ S, $R_i = 0$ Ω a $Y_{kk} = 0,4$ S (odpovídá původnímu svodu skrz pražce), $R_i = 0$ Ω – zobrazeny jsou proudy menší než 0,15 A.



Obrázek 5.6-4: Závislost fází proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro $Y_{kk} = 0 \text{ S}, R_i = 0 \text{ } \Omega$

5.7 Analýza HS se zemním lanem a odporem půdy

Analýza s modelováním zemního lana byla provedena stejně jako v kapitole 5.4, tedy pro kmitočet 75 Hz, nulový odpor ve středech vinutí transformátorů a tlumivek, a pro svod mezi kolejnicemi 0,5 S. Střed transformátorů a tlumivek ale nebyly připojeny přímo k zemi, ale byly připojeny k zemnímu lanu v daném místě. Bylo uvažováno měděné pletené zemní lano s průřezem 50 mm² dle ČSN EN 60228, s maximálním odporem 0,387 Ω/km. Měrná rezistence půdy byla uvažována 1000 Ω · m. Pro toto zadání byly podle vztahů odvozených v předcházejících kapitolách vypočteny tyto parametry pro model zemního lana a půdy v okolí KO:

Koeficient pro vliv skin efektu na odpor lana k_{AC} :

$$k_{AC} = 1,0007236 (-)$$

Vlastní indukčnost lana L_{int} :

$$L_{int} = 3,833 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

Impedance lana způsobená vlivem okolní půdy

$$Z_{ext} = (0,07402 + j \cdot 1,25) \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Celkový odpor lana R_{lano}

$$R_{lano} = R_{DC} \cdot k_{AC} + \text{Re}(Z_{ext})$$
$$R_{lano} = 0,387 \cdot 1,0007236 + 0,07402 = \underline{0,4613 \Omega \cdot \text{km}^{-1}}$$

Celková indukčnost lana L_{lano}

$$L_{lano} = L_{int} + \frac{\text{Im}(Z_{ext})}{\omega}$$
$$L_{lano} = 3,833 \cdot 10^{-3} + \frac{1,25}{2 \cdot \pi \cdot 75} = \underline{6,486 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}$$

Svod lano – kolejový svršek $R_{lano-kolej}$:

$$R_{lano-kolej} = 1,422 \Omega \cdot \text{km}$$

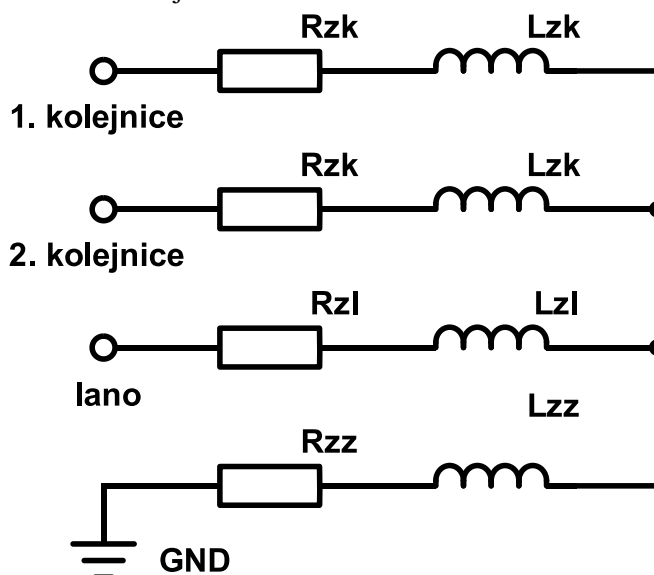
Svod lano – okolní půda $R_{lano-půda}$:

$$R_{\text{lano-p\u00fada}} = 3,698 \Omega \cdot km$$

Svod kolejový svršek – okolní půda $R_{\text{kolej-p\u00fada}}$:

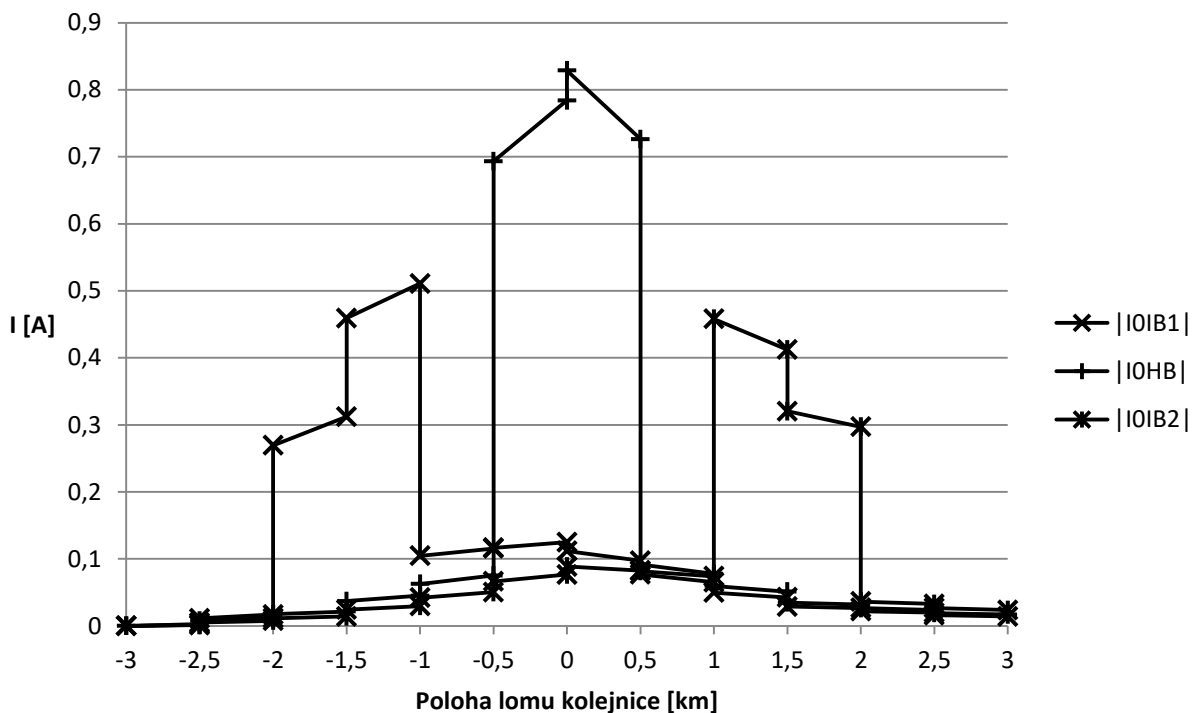
$$R_{\text{kolej-p\u00fada}} = 2,084 \Omega \cdot km$$

Před analýzou havarijního stavu bylo třeba vytvořit nový model pro zakončení KO. Tříbodové zakončení již nestačilo, protože na koncích KO bylo třeba zakončit další prvek – zemní lano. Proto autor navrhl nové čtyřbodové zakončení. Toto zakončení není zapojené „do trojúhelníku“ jako to předchozí, ale je zapojené „do hvězdy“. Tím je myšleno, že všechny volné póly jsou tedy přes impedanci připojeny do jednoho uzlu. Schéma zakončení ukazuje Obrázek 5.7-1.

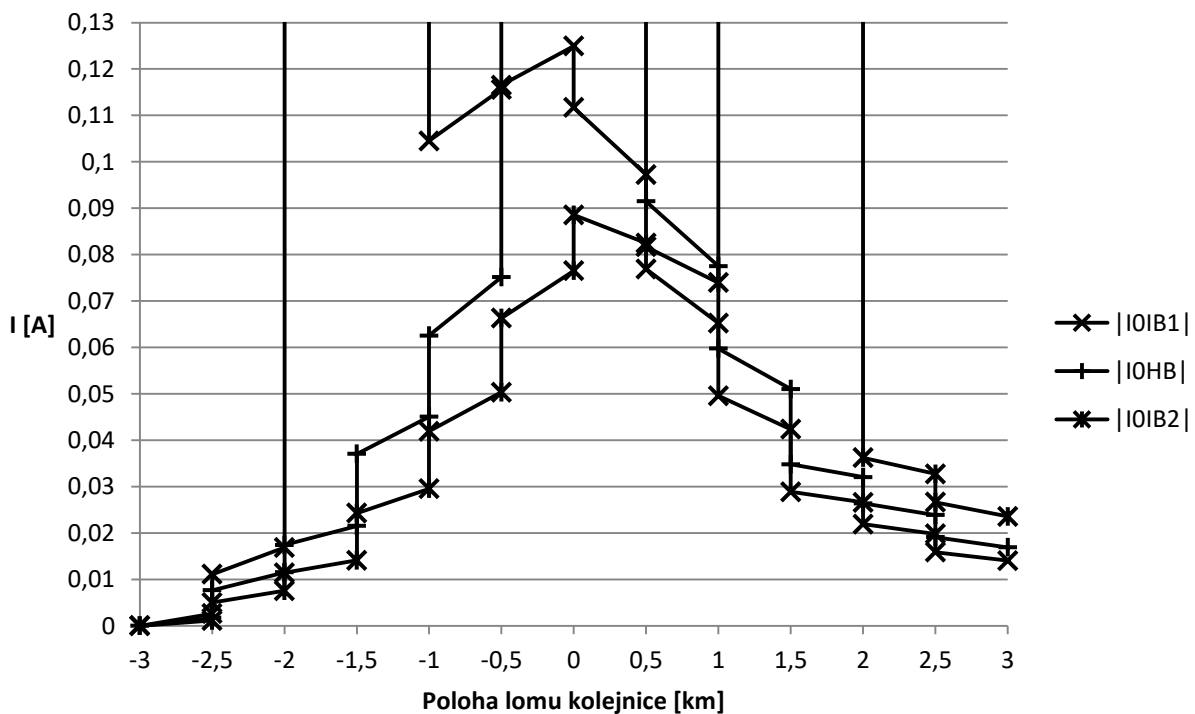


Obrázek 5.7-1: Schéma čtyřbodového zakončení obvodu pro analýzu havarijního stavu s uvažováním lana

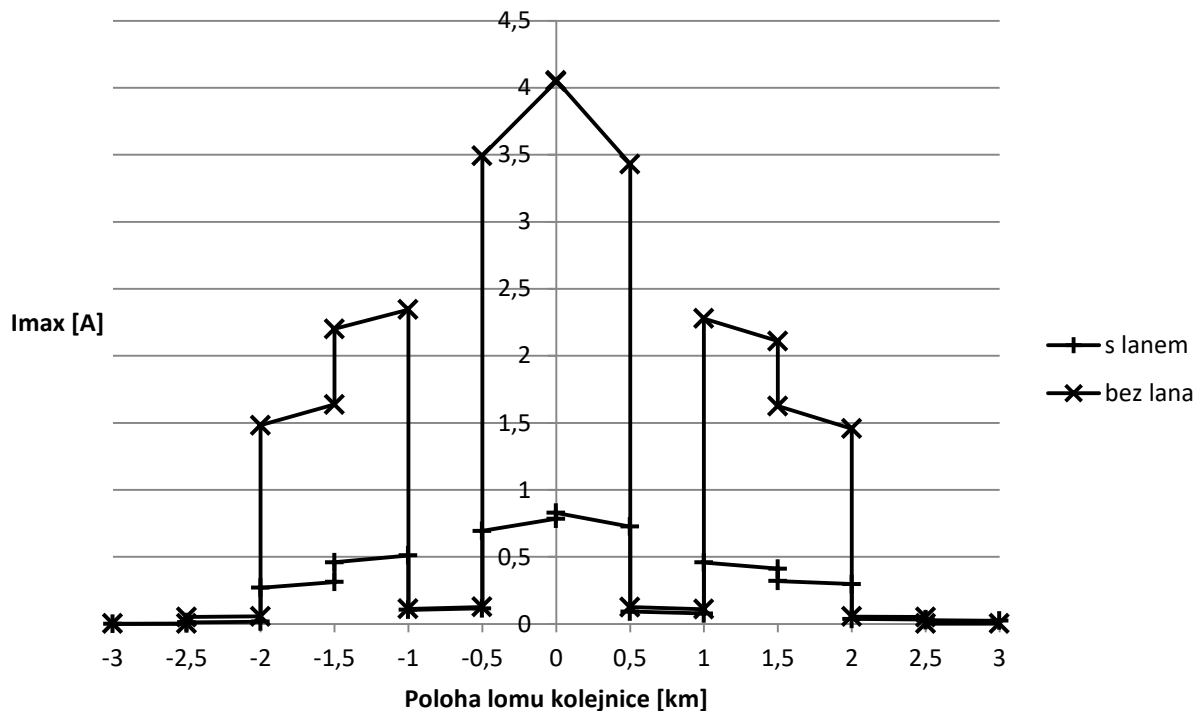
Hodnoty impedanci pro toto zakončení byly určeny obdobně jako pro původní analýzu havarijního stavu v kapitole 5.3. Správnost zakončení obvodu byla ověřena analýzou volného stavu se čtyřbodovým zakončením obvodu a s modelováním zemního lana a země. S korektně zakončeným obvodem už bylo možné provést analýzu havarijního stavu. Její numerické výsledky pro svou obsáhlost nejsou uvedeny, jejich grafické zpracování ukazují Obrázek 5.7-2 a Obrázek 5.7-3.



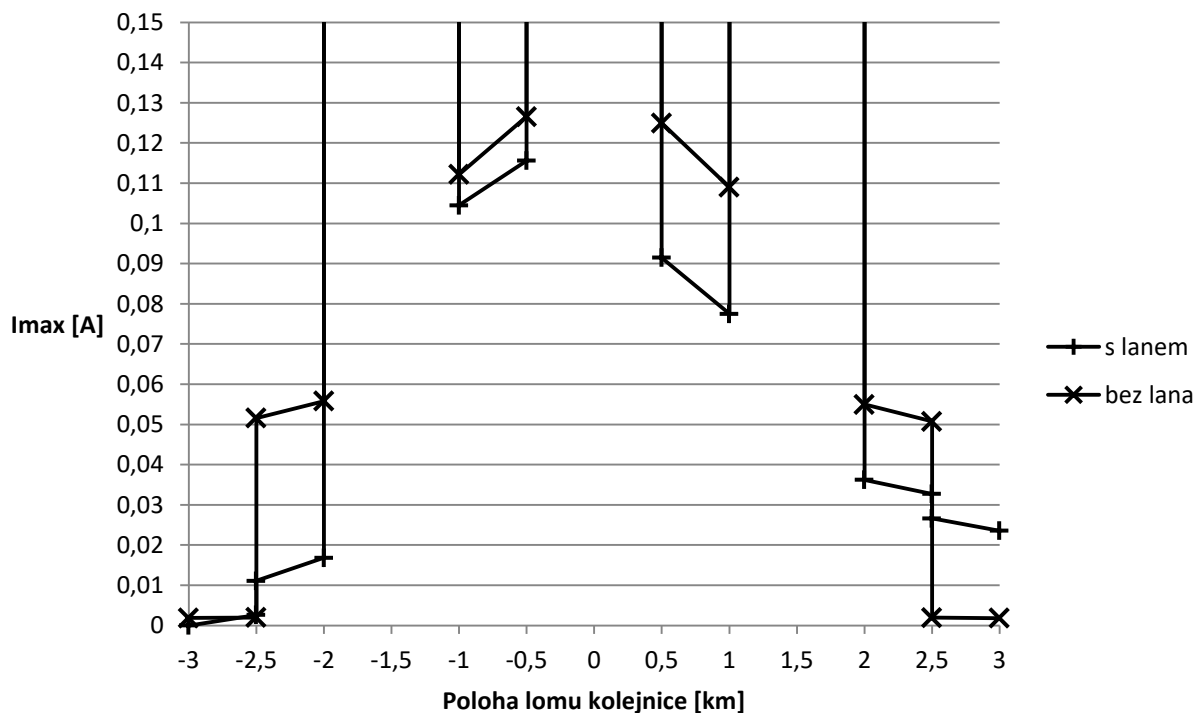
Obrázek 5.7-2: Průběhy proudů středy transformátorů DT 0,75 v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze lomu kolejnice pro $f = 75 \text{ Hz}$, $Y_p = 0,5 \text{ S}$, se zemním lanem $\text{Cu } 50 \text{ mm}^2$



Obrázek 5.7-3: Průběhy proudů středy transformátorů DT 0,75 v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze lomu kolejnice pro $f = 75 \text{ Hz}$, $Y_p = 0,5 \text{ S}$, se zemním lanem $\text{Cu } 50 \text{ mm}^2$ - detail na nízké hodnoty proudů do 0,13 A



Obrázek 5.7-4: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro model s lanem a původní model bez lana $R_i = 0 \Omega$



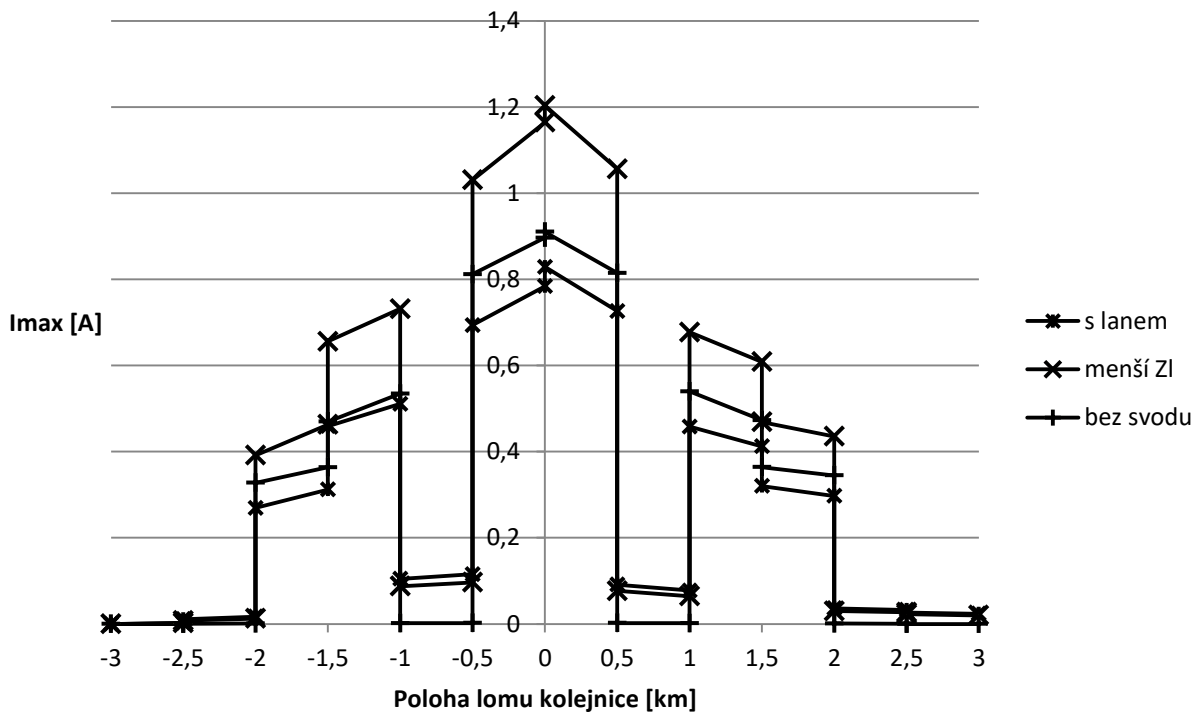
Obrázek 5.7-5: Závislost maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 na poloze lomu kolejnice pro model s lanem a původní model bez lana $R_i = 0 \Omega$ – detail na proudy menší než 0,15 A

Dále bylo provedeno několik analýz, které měnily některé parametry, které byly vypočteny v předchozích podkapitolách. Cílem těchto dalších analýz bylo zjistit závislost výsledků analýzy HS na jednotlivých parametrech a jejich hodnotách. Pro každou analýzu bylo potřeba vypočítat nové hodnoty zakončení. Byly provedeny tyto varianty analýz:

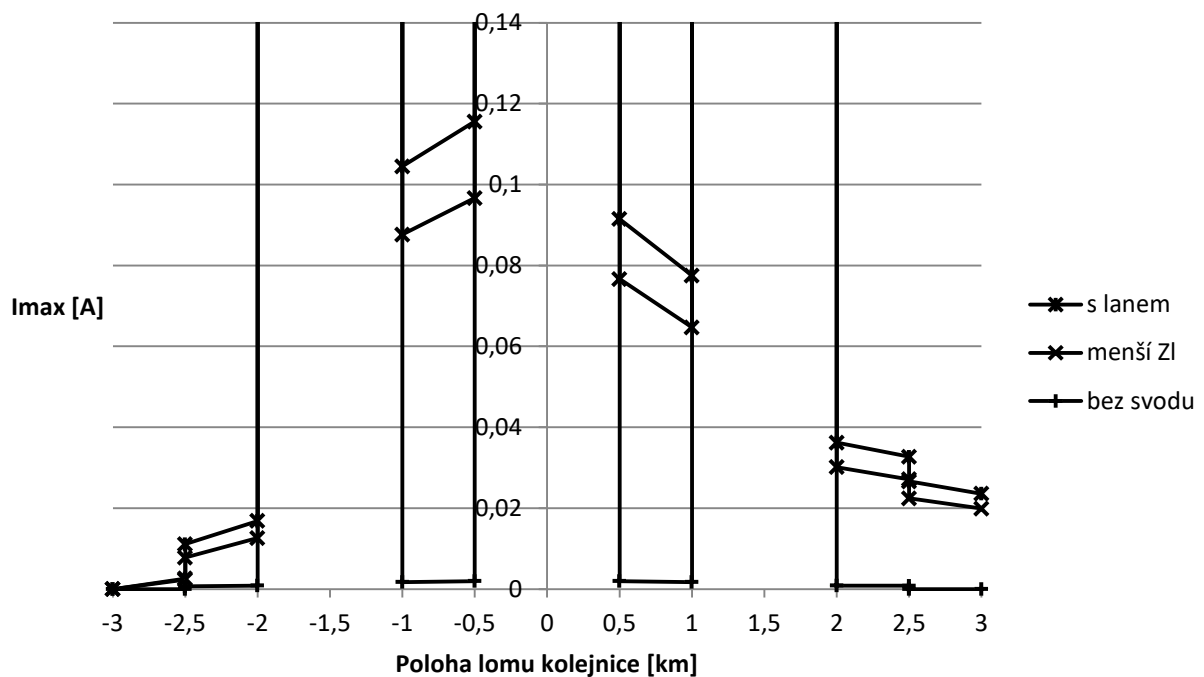


- Analýza s dokonale vodivým lanem ($R_{lano} \rightarrow 0, L_{lano} \rightarrow 0$)
- Analýza se zanedbaným vlivem okolní půdy na podélnou impedanci lana ($R_{lano} = R_{DC} * k_{AC}, L_{lano} = L_{int}$)
- Analýza se zanedbáním svodů mezi svrškem, lanem a půdou ($R_{lano-kolej}, R_{lano-půda}, R_{kolej-půda} \rightarrow \infty$)

Obrázek 5.7-6 a Obrázek 5.7-7 ukazují průběhy maximálních amplitud proudů středy transformátorů DT 0,75 v závislosti na poloze lomu kolejnice pro původní a poslední dvě varianty analýzy. První alternativní varianta, analýza s dokonale vodivým lanem, vyšla v podstatě stejně jako původní analýza havarijního stavu popsaná v kapitole 5.4.



Obrázek 5.7-6: Průběhy proudů v závislosti na poloze lomu kolejnice pro tři varianty analýzy s uvažováním lana. Vyneseno je maximum ze tří snímaných proudů pro každou polohu lomu kolejnice. Modře je původní varianta, červeně je varianta s menší podélnou impedancí lana, a zeleně je varianta, která neuvažuje svody přidáné v tomto modelu.



Obrázek 5.7-7: Průběhy proudů v závislosti na poloze lomu kolejnice pro tři varianty analýzy s uvažováním lana – detail na proudy menší než 0,14 A. Vyneseno je maximum ze tří snímaných proudů pro každou polohu lomu kolejnice. Modře je původní varianta, červeně je varianta s menší podélnou impedancí lana, a zeleně je varianta, která neuvažuje svody přidané v tomto modelu.

Z grafů je vidět, že impedance zemního lana a zejména menší svod z kolejnic do lana podstatně snižují minimální hodnoty proudů, které je třeba detekovat pro lomy kolejnic na souřadnicích -1, -0,5, 0,5 a 1 km od HB, tedy pro lomy kolejnic mezi dvojicí tlumivek SYT, které se zde nacházejí. Pro případné další analýzy je třeba reálným měřením zjistit skutečný svod, který se zde vyskytuje.

V této kapitole bylo provedeno několik analýz havarijního stavu zkoumaného neohraničeného kolejového obvodu, a to včetně celé řady přípravných analýz. Smyslem těchto přípravných analýz bylo připravit správný model kolejového obvodu se správnými hodnotami parametrů pro provedené analýzy havarijního stavu.

Kromě základní analýzy havarijního stavu s dokonale uzemněnými středy transformátorů a tlumivek byla provedena analýza s nedokonale uzemněnými středy transformátorů a tlumivek pro posouzení vlivu uzemnění na detekci HS. Dále byla provedena analýza, která zjišťovala vliv izolačního odporu pražců na detekci HS.

Pro další analýzu byla provedena rešerše možností modelování země pro vedení elektřiny. Dále byly analyticky zjištěny parametry pro model zemního lana a půdy pro pokročilou analýzu HS, která tyto prvky v obvodu brala v úvahu. Byla provedena tato analýza a její další varianty.

Výsledky všech analýz je možné zhodnotit tak, že pokud se při detekci HS bude spoléhat na proudy středy transformátorů DT 0,75, závisí výsledky podstatně na vodivosti vzájemného spojení středů primárních vedení výstroje a na svodu mezi kolejnicemi a tímto spojením. Pokud ale bude měřen proud středy tlumivek, bude HS snadné detekovat.



6 PODROBNÁ ANALÝZA ŠUNTOVÉHO STAVU

Tato kapitola se zabývá podrobnou analýzou šuntového stavu s využitím dvojbranového modelu. Ten byl vytvořen tak, jak je popsáno v kapitole 3.7. Parametry byly převzaty (jak uvádí kapitola 4.1).

6.1 Analýza volného stavu s podrobným modelem

Pro ověření správně sestaveného modelu byla nejprve provedena analýza volného stavu. Výsledky analýzy volného stavu uvádí Tabulka 6.1-1 [13]:

Tabulka 6.1-1: Srovnání výsledků analýzy volného stavu s dvojbranovým modelem a analýzy doc. Hospodky [13]

	Tato analýza				Hospodka [13]	
	Re	Im	Abs	argument	abs	argument
VIB1	-0,331	-1,189	1,234	-105,6	1,23	-105
VHB	-0,756	-3,550	3,630	-102,0	3,63	-102
VIB1	-0,331	-1,189	1,234	-105,6	1,23	-105
IIB1	0,365	-0,661	0,755	-61,1	0,76	-61
IHB	-4,880	-2,408	5,442	-153,7	5,44	-154
IIB2	0,365	-0,661	0,755	-61,1	0,76	-61

Aby bylo dosaženo dalšího zjednodušení obvodu, který bude použit k analýze, rozhodl se autor nahradit napájecí transformátory a zdroje proudu náhradním Nortonovým obvodem. Za tímto účelem byl v knihovně PraCAN vyřešen obvod obsahující stykový transformátor se zdrojem proudu zapojeným na straně s vyšším napětím. Byly zjištěny proudy nakrátko a vnitřní admitance pro obě nastavení napájení. Z těchto dvou prvků byl pak sestaven náhradní Nortonův obvod pro napáječe. Nahrazení bylo ověřeno simulací volného stavu s obvodem, který obsahoval místo modelů transformátorů se zdroji proudu náhradní Nortonovy obvody. Výsledky byly identické jako v tabulce výše, a nahrazení je tak v pořádku.

6.2 Analýza šuntového stavu

Nyní bylo možné přistoupit k vlastní podrobné analýze šuntového stavu. Ta byla provedena tak, jak popisuje kapitola 3.7. Autor vytvořil vlastní proceduru, která provede vlastní analýzu ŠS, čímž se v kombinaci s procedurou pro určení parametrů SYT, DT a svršku velice zjednodušila automatizace analýz šuntového stavu pro libovolné kmitočty.

Výsledky analýzy s krokem 25 m pro $f = 75\text{Hz}$, $Y_p = 0,5\text{ S}$, $R_s = 0,1\ \Omega$ obsahuje příloha 10.2. Výsledky se shodují s analýzou šuntového stavu pomocí článkového modelu v kapitole 5.2 a s výsledky doc. Hospodky [14]. Autor se tak naučil provádět podrobnou analýzu šuntového stavu po celém obvodu. To se mimo jiné hodilo pro analýzy popsané v další kapitole.



7 PODROBNÁ ANALÝZA PRŮJEZDU VLAKU KOLEM IB NA VYSOKÝCH FREKVENCÍCH

Tato kapitola se zabývá analýzami průjezdu vlaku kolem IB při frekvenci buzení 50 kHz. První podkapitola se zabývá pouze úpravami algoritmu převzatého od doc. Hospodky. Další podkapitoly se zabývají vypracováním nového algoritmu analýzy, který umožňuje krok analýzy nezávislý na vzdálenosti mezi šuntů vlaku, analýzou s alternativním nastavením buzení (buzení měkkým napěťovým zdrojem). Posléze je popsáno měření parametrů transformátoru DT 0,75 a tlumivky SYT pro vysoké kmitočty a analýza průjezdu vlaku, která tyto opravené parametry používá.

7.1 Analýza průjezdu vlaku kolem IB při buzení na frekvenci 50 kHz – odečtení hodnot napětí ve vzdálenosti 5, 10 a 20 metrů od IB.

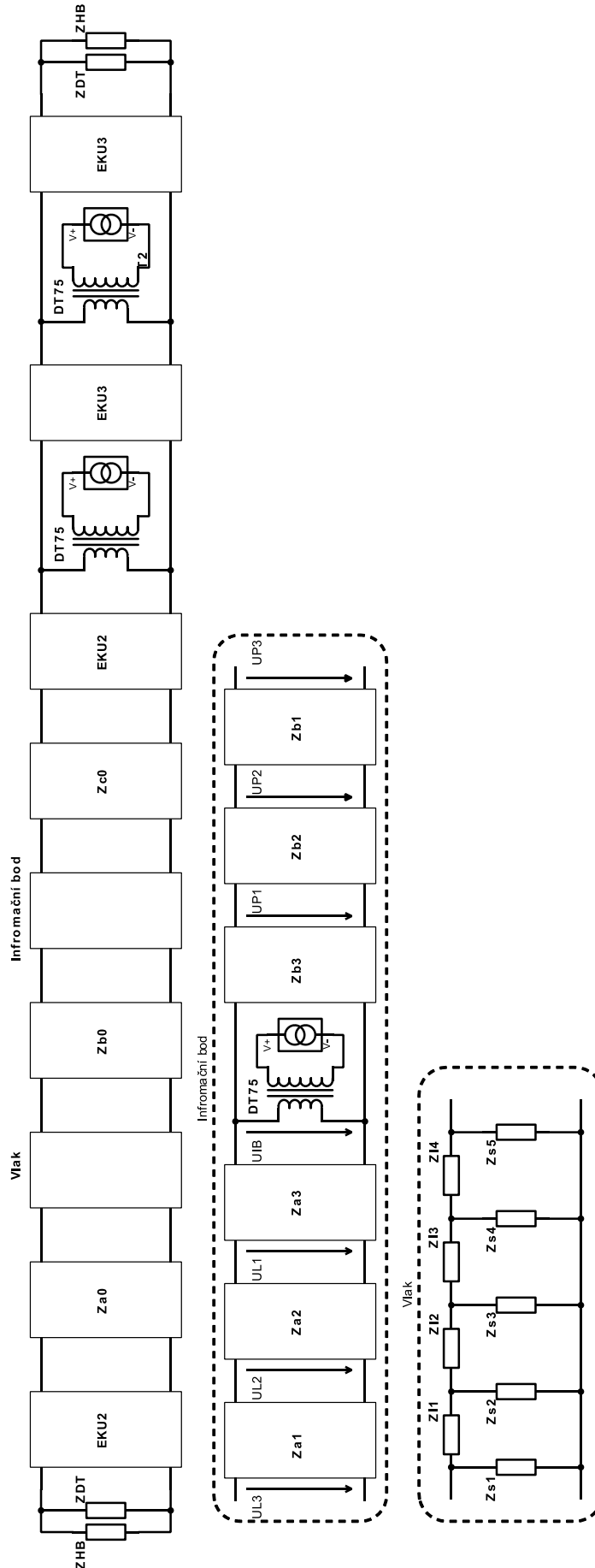
Z dosavadních analýz šuntového stavu vyplývá, že NKO je schopen správně detekovat přítomnost vlaku, a je tedy bezpečný, ale není velmi dobrý v detekování nepřítomnosti vlaku, a není tedy velmi spolehlivý. Tímto je myšlen problém ohraničenosti detekce, kdy měřené veličiny (fáze proudů v IB) dosáhnou hodnot indikujících přítomnost vlaku už tehdy, když vlak je od hranice KO vzdálen stovky metrů (liší se pro různé frekvence a hodnoty svodu a šuntu). Při použití takovýchto kolejových obvodů by pak docházelo k obsazení kolejového obvodu dávno před tím, než by do něho vlak vjel. Řešením tohoto problému by bylo detekovat průjezd vlaku do KO pomocí jiného prostředku. Jedním takovým prostředkem může být samostatný sériový kolejový obvod pracující na vysoké frekvenci, například 50 kHz [13].

Základní postup při analýze průjezdu vlaku kolem IB, který byl převzat od doc. Hospodky, popisuje kapitola 3.8. Aby bylo možné odečítat napětí v bodech před a za IB, bylo nutné si uvědomit tři skutečnosti:

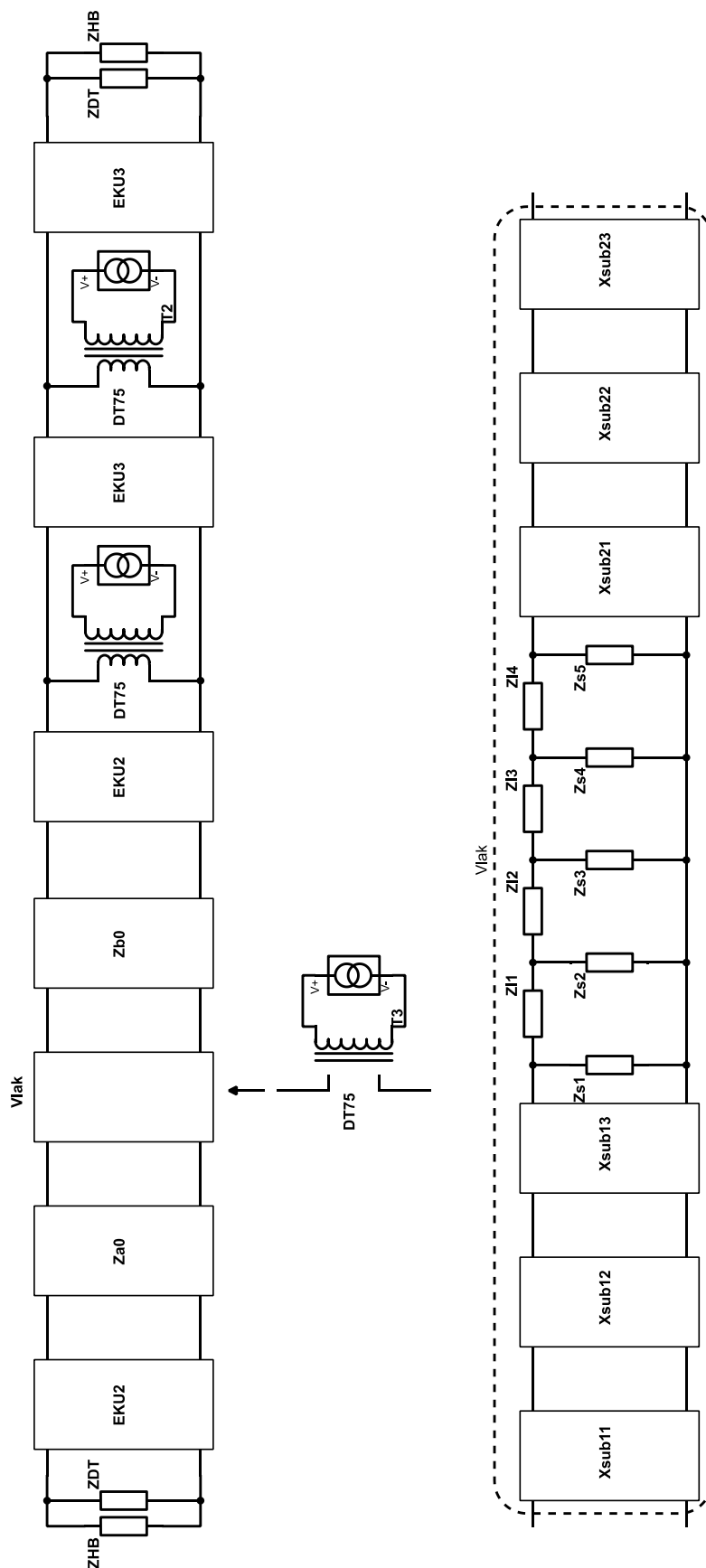
Zprvé, pokud je vlak daleko od IB, nejsou v okolí IB v modelu žádné uzly, ze kterých by bylo možné napětí odečíst. Je tedy třeba tyto uzly vytvořit tím, že se jeden EKU „roztrhne“ na několik kratších.

Zadruhé, pokud je krajní náprava vlaku blízko u IB, je třeba odečítat napětí na šuntech vlaku, ale i mimo něj. To lze řešit tak, že se model vlaku rozšíří o dvojbrany, jejichž délka odpovídá vzdálenosti mezi soukolími, tedy kroku analýzy. Těchto dvojbranů musí být tolik, aby se v situaci, kdy je první soukolí vlaku v nejbližším bodě od IB, kde chceme odečítat napětí, bylo možné odečítat napětí i v nejbližším bodě od IB na druhé straně. Tento problém by bylo možné řešit i elegantněji, s menším počtem dvojbranů, ale toto řešení představuje nejmenší úpravu stávajícího algoritmu. Oproti původnímu stavu výpočet přechází do druhé části, už když se vlak k IB přiblíží na vzdálenost rovnou nejbližšímu místu, kde se měří napětí, ne až když najede nad něj. Podle výše popsaných zjištění byl upraven model docenta Hospodky tak, aby bylo možné odečítat napětí v bodech mimo IB.

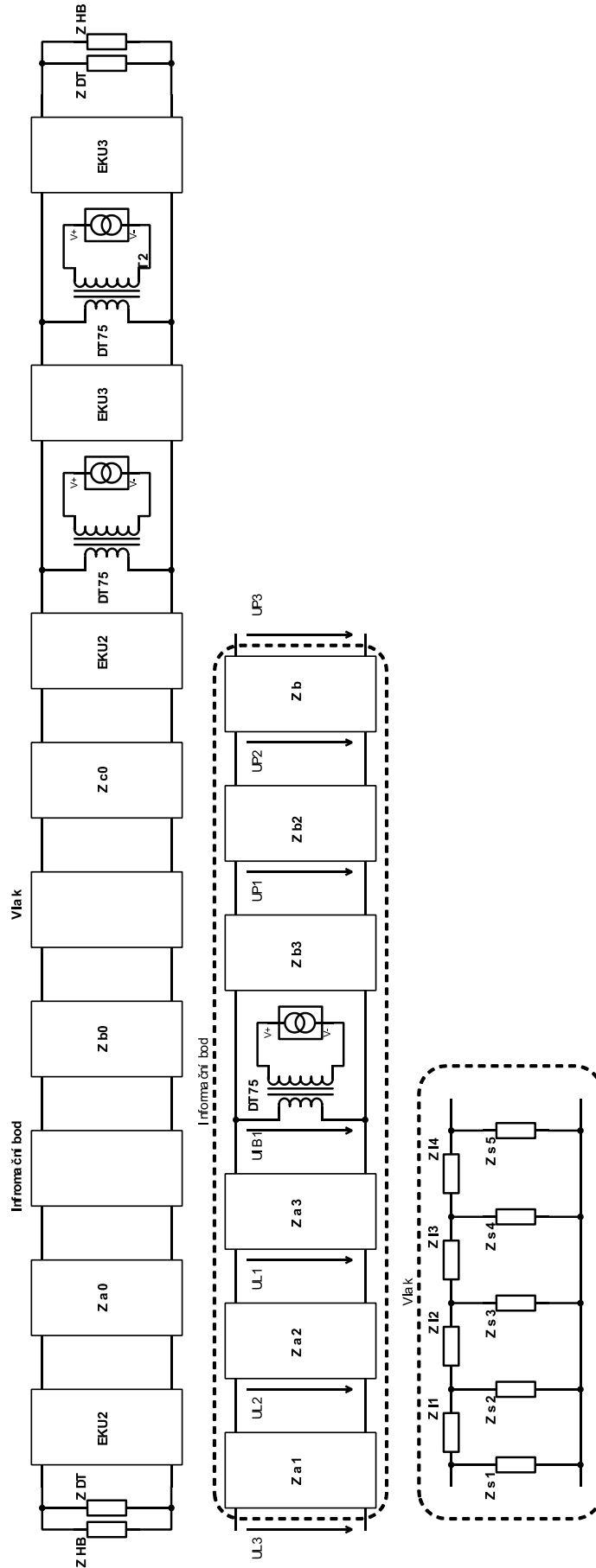
Obrázek 7.1-1 až Obrázek 7.1-3 ukazují, jak vypadají obvody pro každou část analýzy (když je vlak před, nad a za IB). Na obrázcích je příklad vlaku s pěti šuntů. Napětí je měřeno na třech místech, která jsou bezprostředně za sebou (vzdálená od sousedního stejně, jako jsou vzájemně vzdálené šuntů vlaku). Tyto body jsou na okrajích dvojbranů Za1 až Za3, Zb1 až Zb3, a Xsub11 až Xsub23. Na obrázcích jsou tyto body značeny UL1 až UL3 a UP1 až UP3, kde L/P značí, na kterou stranu od IB snímací bod leží, a číslovka jeho pořadí. V samotných analýzách pak číslovka značí vzdálenost bodu od IB. V této první analýze to bylo 4, 8 a 20 m a 10, 20 a 30 m, podle typu vlaku. V následujících analýzách to bude 0,5 a 1 m.



Obrázek 7.1-1: Model kolejového obvodu pro první část analýzy průjezdu vlaku



Obrázek 7.1-2: Model kolejového obvodu pro druhou část analýzy průjezdu vlaku



Obrázek 7.1-3: Model kolejového obvodu pro třetí část analýzy průjezdu vlaku



Číselné výsledky nejsou pro jejich obsáhlost uvedeny. Grafické výsledky uvádí příloha 10.3. Protože cílem práce bylo pouze upravit analýzu docenta Hospodky, budou zde hodnoceny pouze výsledky této práce. Jak je vidět na grafech, z kombinace měření napětí v IB a jednoho místa před a jednoho za ním lze snadno odhadnout směr průjezdu vlaku, protože napětí v těchto vzdálenějších místech spadne při příjezdu vlaku dříve, než v informačním bodě. O vlaku, který přijíždí z druhé strany IB, než na které napětí měříme, nám ale toto měření nic navíc neřekne. Proto je třeba měřit napětí na obou stranách. Případně měřit pouze na jedné straně, a když napětí v IB spadne, aniž by spadlo napětí před ním, tak předpokládat, že vlak přijel z druhé strany.

Průběhy napětí ve zvolených bodech před a za IB sice závisí na délce vlaku a impedanci šuntu, ale mění se podobně jako průběhy napětí v IB a vždy je zachováno to, že napětí v bodě mimo IB spadne dříve, než napětí v IB. Podobně jako u původní analýzy, při impedanci šuntu 10x větší, než je změřená (stanovená) impedance nelze pro detekci průjezdu vlaku použít jak napětí v IB, tak ani napětí ve zvolených bodech mimo IB. Podobně nelze žádná napětí použít ani u průjezdu vlaku s nesymetrickým rozložením šuntů, protože jedna strana vlaku nedostatečně šuntuje. Je sice opět zachováno to, že napětí na bodech před IB spadne dříve než napětí v IB, a to z obou směrů, ale napětí spadne, až když vlak už polovinou náprav IB přešel.

7.2 Podrobná analýza průjezdu vlaku kolem IB na 50 kHz s krokem analýzy 0,5 a 0,1 m

Protože analýzy popsané v předchozí podkapitole ověřily možnost využití sériového obvodu na 50 kHz pro detekci průjezdu vlaku, bylo vhodné provést náročnější analýzy, které by zachycovaly i stavy jiné, než když je soukolí vlaku přímo nad informačním bodem. Dále se jevilo žádoucí analyzovat průjezd vlaku, jehož nápravy více odpovídají reálným vozům. Většina vozů na železnici má dvě nápravy umístěné blízko sebe, s velkou vzdáleností mezi těmito nápravami, jako například u vozu bmz, který má vzdálenosti mezi nápravami 2, 16 a 2 m.

Pro splnění tohoto zadání bylo třeba přepracovat algoritmy, které byly použity pro analýzy popsané v předchozí podkapitole. V případě, kdy vlak je od IB vzdálený, stačilo algoritmus upravit pouze tak, že se vlak pohybuje po trati s libovolným krokem (krokem simulace), ne pouze po vzdálenostech rovných násobku vzdálenosti mezi soukolími, jak to bylo původně. Pro tuto část analýzy byla také vytvořena funkce, která generuje netlist pro libovolný vlak daný dvěma vzdálenostmi mezi šuntů, které se opakují. Mohl tak být vytvořen například vlak, který odpovídá průjezdu vozu podobnému vozu bmz, se čtyřmi nápravami vzdálenými 2, 20 a 2 metry, v tomto pořadí. Délka 20 m je zvolena proto, že se jedná o největší povolenou vzdálenost mezi šuntů na drahách v EU. Déle byl algoritmus pro tuto část analýzy optimalizován v tom, že obvod se pomocí knihovny PraCAN řeší pouze jednou. Výsledky vyjdou v závislosti na proměnné x , do které se pak pouze dosazuje [32].

Pro situaci, kdy se vlak nachází nad IB (nebo některým ze snímačů napětí), bylo třeba algoritmus řešení zcela přepracovat. Zejména už nebylo praktické vytvořit jeden netlist vlaku, a tam pak postupně připojovat transformátor informačního bodu. Byl vytvořen nový algoritmus, kdy se pro každou pozici vlaku sestavuje nový netlist, který v sobě kombinuje vlak, IB i snímače napětí. Jednotlivé prvky (šuntů, transformátor, místa pro odečet napětí) jsou spojeny dvojbrany, jejichž parametry odpovídají EKU správné délky, které spojuje dané prvky. Tento netlist je zařazen do obvodu místo IB, parametry dvojbranů, které sousedí s tímto novým netlistem, jsou pro každý krok analýzy vypočteny znovu tak, aby odpovídaly správně dlouhému úseku EKU, a je provedena analýza pomocí programu PraCAN.

Byly provedeny analýzy průjezdu pro tyto vlaky:

- Vlak dlouhý 24 m se vzdáleností mezi šuntů 4 m
- Vlak dlouhý 80 m se vzdáleností mezi šuntů 10 m
- Vlak dlouhý 24 m se vzdálenostmi mezi šuntů 2, 20 a 2 m



- Vlak dlouhý 20 m se vzdálenostmi mezi šunty 2, 16 a 2 m – prvotní analýzy podle vozu bmz, provedené předtím, než byl daný rozměr opravený na maximální možnou vzdálenost náprav 20 m
- Osamocený šunt

Analýzy byly provedeny s variací dvou parametrů, a to s variací impedance šuntu (0 až $9/78^\circ \Omega$) a s variací svodu mezi kolejnicemi (0 až $7/76^\circ$ S/km). Vždy byl měněn pouze jeden parametr najednou. Nebyly provedeny všechny kombinace analýz, které zde jsou nastíněny, naopak byly provedeny pouze ty, které mohly přinést nějakou přidanou hodnotu, co se týče detekce průjezdu vlaku na 50 kHz.

Numerické výsledky analýz pro svou rozsáhlost nejsou uvedeny. Grafické výsledky analýz uvádí v omezené míře příloha 10.4. Více grafů není uvedeno, aby se předešlo přílišnému nafukování příloh.

Pan doktor Sadil přišel s inovativním přístupem k detekci průjezdu vlaku, který spočívá v rozdílu napětí měřených na opačných stranách IB. Proto jsou v příloze uvedeny také grafy s průběhy těchto rozdílů.

7.3 Podrobná analýza průjezdu vlaku kolem IB na 50 kHz s jiným nastavením zdroje

Zdrojem energie pro kolejové obvody bude obecně vzato polovodičový střídač. Protože je snazší takový střídač řídit (a zejména dimenzovat) jako zdroj napětí než jako zdroj proudu, stojí za úvahu se zabývat nahrazením proudového zdroje zdrojem napětí i pro buzení na 50 kHz, případně jiné zvolené vysoké frekvenci.

Protože je ale zdroj při průjezdu vlaku přes stykový transformátor vystavován zkratu, musel by být jakýkoli tvrdě regulovaný napětí zdroj dimenzován na nesmyslně vysoké proudy. Jako řešení se nabízí navrhnout zdroj měkký. V návrhu se autor zabýval pouze modelem zdroje složeným ze sériové kombinace ideálního zdroje napětí a rezistence. Je otázkou dalších návrhů, do jaké míry bude tato vnitřní impedance dosažena absencí zpětnovazební regulace zdroje napětí a do jaké míry bude dosažena diskretním ochranným odporem, který bude zdroj chránit před zkratem.

Při analýzách volného stavu bylo zjištěno, že napětí zdroje napětí zapojeného do sekundárního vinutí transformátoru DT se přeneslo do napětí na primárním vinutí (připojeném do kolejového obvodu) v poměru přibližně 100:1. Aby tak bylo v blízkosti IB a HB s rezervou dosaženo fritovacího napětí 1,1 V, bylo napětí zdroje napětí zvoleno 120 V. Při výpočtu velikosti ochranného odporu byl maximální proud nakrátko zvolen jako 3 A. Aby bylo dosaženo toho, že proud zdroje napětí nikdy 3 A nepřesáhne, byla velikost ochranného odporu zvolena jako 40 Ω . Buzení v IB a HB je stejné.

$$|V_{HB}| = |V_{IB}| = 120 V$$

$$\varphi(V_{HB}) = \varphi(I_{IB}) = 0 \text{ rad}$$

$$R_o = 40 \Omega$$

Modely obvodu a algoritmy analýz byly stejné jako v předchozí podkapitole. Krok analýzy byl zvolen 0,5 m, rozsah analýzy byl zvolen ± 100 m. Analýzy byly provedeny pouze pro průjezd vlaku dlouhého 24 m se vzdálenostmi mezi nápravami 2, 20 a 2 m, protože z předchozích analýz s proudovými zdroji vyplynulo, že z uvažovaných vlaků (vlak 80 m, vlak 24 m s vzdálenostmi 4 m) se jedná o nejhorší případ.

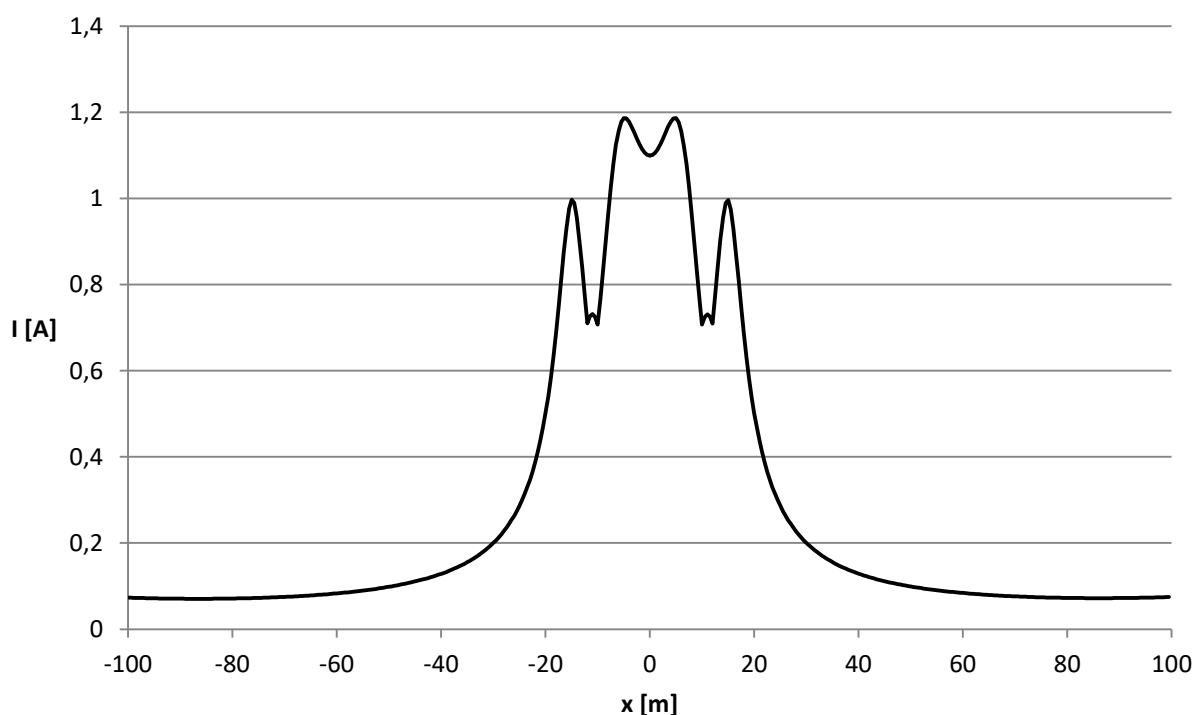
Aby bylo zamezeno přílišnému nafukování příloh, bude zde uvedena jen reprezentativní část grafických výsledků. Obrázek 7.3-1 obsahuje průběh amplitudy proudu v informačním bodě v závislosti na poloze středu vlaku pro výchozí hodnotu šuntu. Maximální efektivní hodnota proudu na nízkonapětíové straně transformátoru nepřesáhne 1,2 A. Obrázek 7.3-2 Ukazuje průběh všech měřených napětí v okolí informačního bodu. Vidíme, že napětí měřená nejdále od IB a nejbližší vlaku spadnou nejdříve, stejně jako je to popsáno v kapitole 7.1. V oblasti kolem $x = 0$ jsou ale všechna napětí velká, a pro správnou detekci



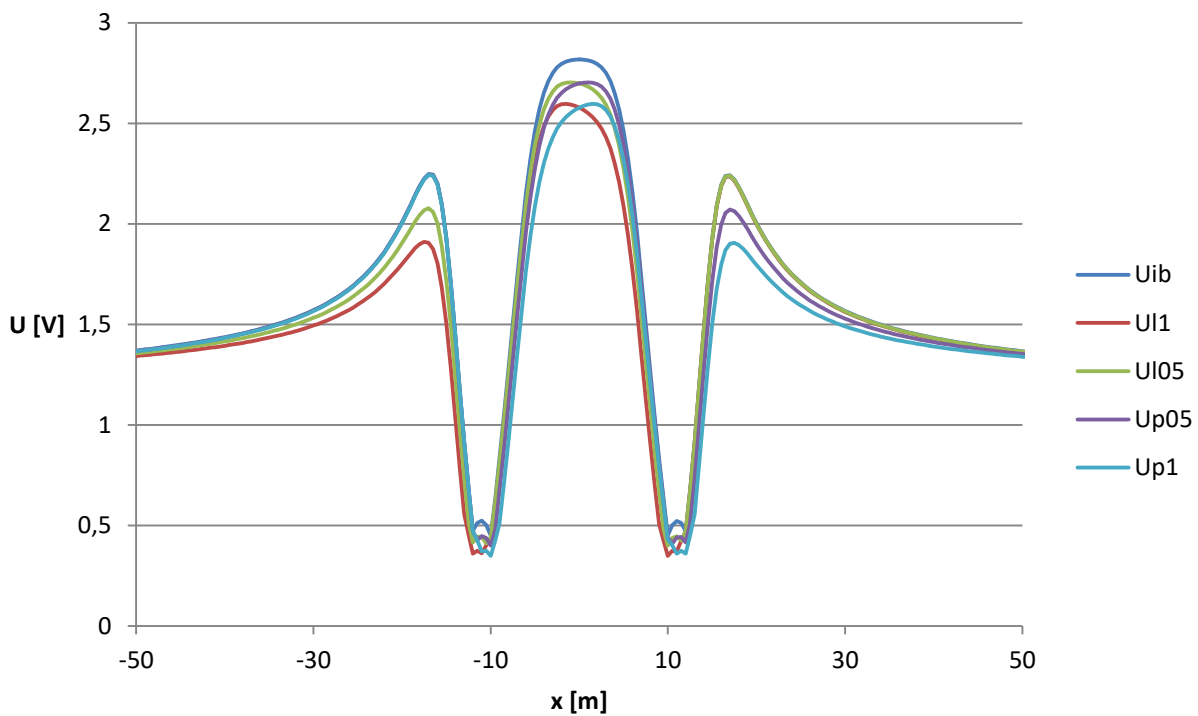
průjezdu vlaku tak bude třeba použít sofistikovanější algoritmus, jako je Sadilův algoritmus zmiňovaný v kapitole 7.2. Proto je zde uveden i Obrázek 7.3-3, který zachycuje rozdíly napětí ve snímačích na opačných stranách od IB pro potřeby tohoto algoritmu.

Z posledního obrázku vidíme, že hodnoty pro všechny šuntové impedance jsou velmi podobné, a mohly by tedy být postihnuty stejnými pravidly pro detekci. Hodnoty pro devítinásobnou impedanci už jsou ale podstatně jiné, a průjezd takového vlaku už by nebylo možné detekovat stejně nastaveným algoritmem. Z tohoto vyplývá možnost, že použití Sadilova algoritmu určuje limit pro šuntovou impedanci náprav na 50 kHz.

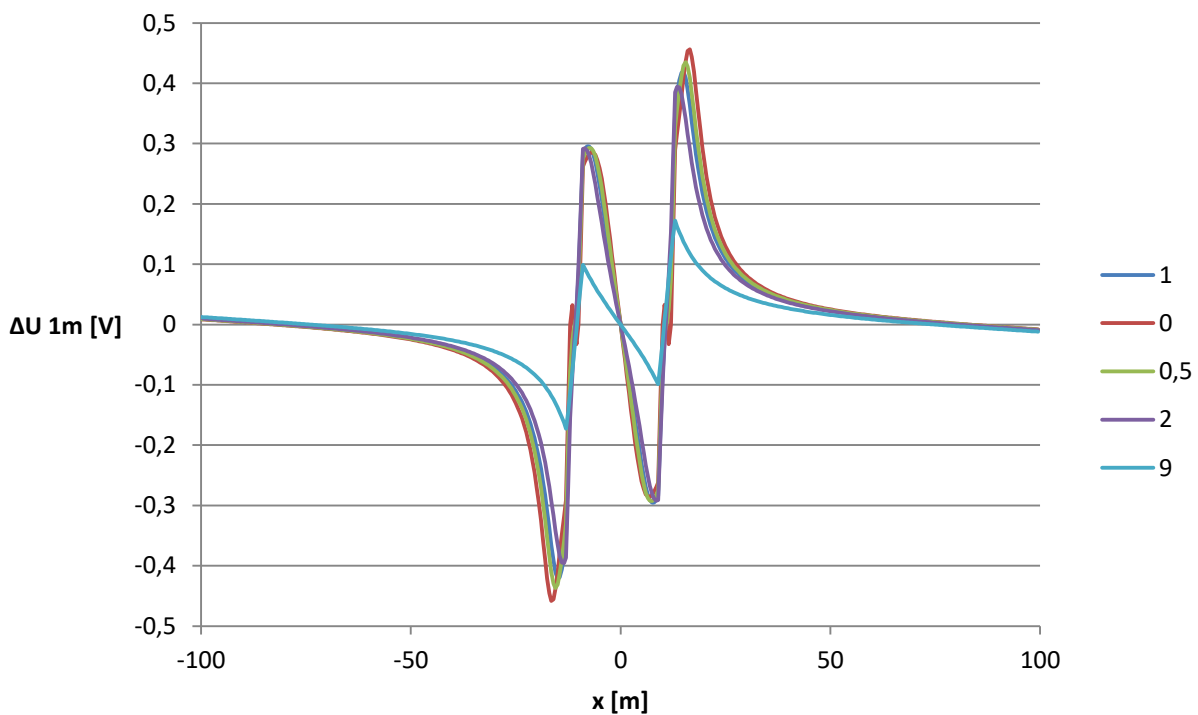
Co se týče ověření napájení zdrojem napětí, byl tento soubor analýz úspěšný. I když nelze toto napájení použít k přímé detekci průjezdu pouze pomocí amplitud napětí, tato možnost nebyla jistá ani pro napájení zdrojem proudu. S využitím sofistikovaných algoritmů detekce průjezdu vlaku lze ale toto napájení použít stejně jako napájení proudovým zdrojem.



Obrázek 7.3-1: Průběh proudu v IB v závislosti na poloze středu vlaku x pro 50 kHz, napěťové napájení, nové parametry transformátorů, tlumivek a svršku, a výchozí šuntovou impedanci.



Obrázek 7.3-2: Průběhy napětí v IB a ve snímacích bodech 0,5 a 1 m nalevo a napravo od něj. U_{ib} značí napětí v informačním bodě, ostatní body jsou značeny U_{xy} , kde x značí umístění snímacího bodu nalevo (l) nebo napravo (p), a y značí vzdálenost snímacího bodu od IB v metrech.



Obrázek 7.3-3: Rozdíly mezi napětími ve snímacích místech 1 m nalevo a napravo od IB pro různé hodnoty impedancí šuntu, číslo má význam násobku výchozí impedance.



7.4 Podrobná analýza průjezdu vlaku kolem IB na 10, 20, 30 a 50 kHz s nově změřenými parametry.

Použití napětí na 50 kHz pro detekci průjezdu vlaku velice ztěžuje fakt, že při průjezdu vlaku s maximální povolenou vzdáleností mezi nápravami (20 m) dochází ke vzrůstu napětí mezi nápravami. Kdyby napětí zůstávalo nízké po celou dobu průjezdu vlaku, detekci průjezdu by to velmi zjednodušilo. Jednou z možností, jak tohoto docílit, je snížení kmitočtu, na kterém je tento pomocný KO provozován. Dalším důvodem k provedení analýz na nižších kmitočtech je fakt, že zde existují limity rušení od vozidel elektrické trakce. Ty by umožnily při technickém návrhu tolerovat určitou náchylnost kolejového přijímače vůči rušení.

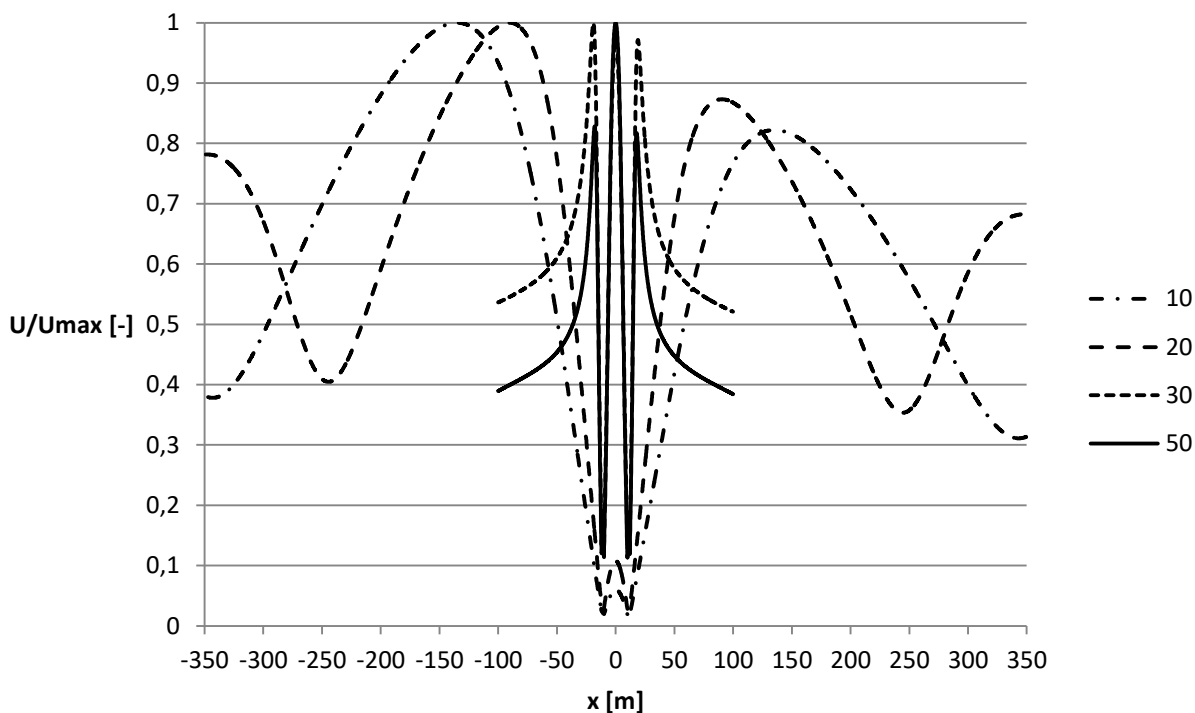
Proto byly provedeny analýzy průjezdu vlaku kolem IB na 10, 20, 30 a 50 kHz. Analýzy na 50 kHz byly znovu provedeny proto, že všechny dosavadní analýzy s napájením proudovými zdroji byly provedeny se špatnou hodnotou podélné impedance železničního svršku, a proto musela být provedena nová analýza se správným parametrem Z_l .

Modely obvodu a algoritmy analýz byly stejné jako v podkapitole 7.2. Analýzy byly provedeny s krokem 0,1 m, s rozsahem analýzy 100 m (pro některé kmitočty byl rozšířen na ± 400 m), pouze pro vlak 24 m (se vzdálenostmi mezi soupravami 2, 20 a 2 m).

Byly analyzovány tři varianty: pro výchozí, poloviční a dvojnásobnou impedanci šuntu. Celkem tedy bylo provedeno dvanáct analýz průjezdu vlaku kolem IB.

Obrázek 7.4-1 ukazuje závislost amplitudy napětí v IB na poloze vlaku pro 4 analyzované frekvence pro výchozí šuntovou impedanci. Napětí byla normalizována, protože předmětem těchto analýz není hledat správné nastavení napájení KO. Vidíme, že pro 30 a 50 kHz napětí v okolí $x = 0$ (když je střed vlaku přímo nad IB) stoupá nad úroveň napětí, která se v IB vyskytuje, když je vlak od IB daleko. Pro 10 a 20 kHz ale může být určena hladina napětí (například 0,2 v poměrných jednotkách na grafu), která s jistotou určuje dvě možné situace: pokud je napětí nižší než 0,2, vlak se nachází v blízkosti IB, pokud je vyšší, vlak se nachází daleko od IB.

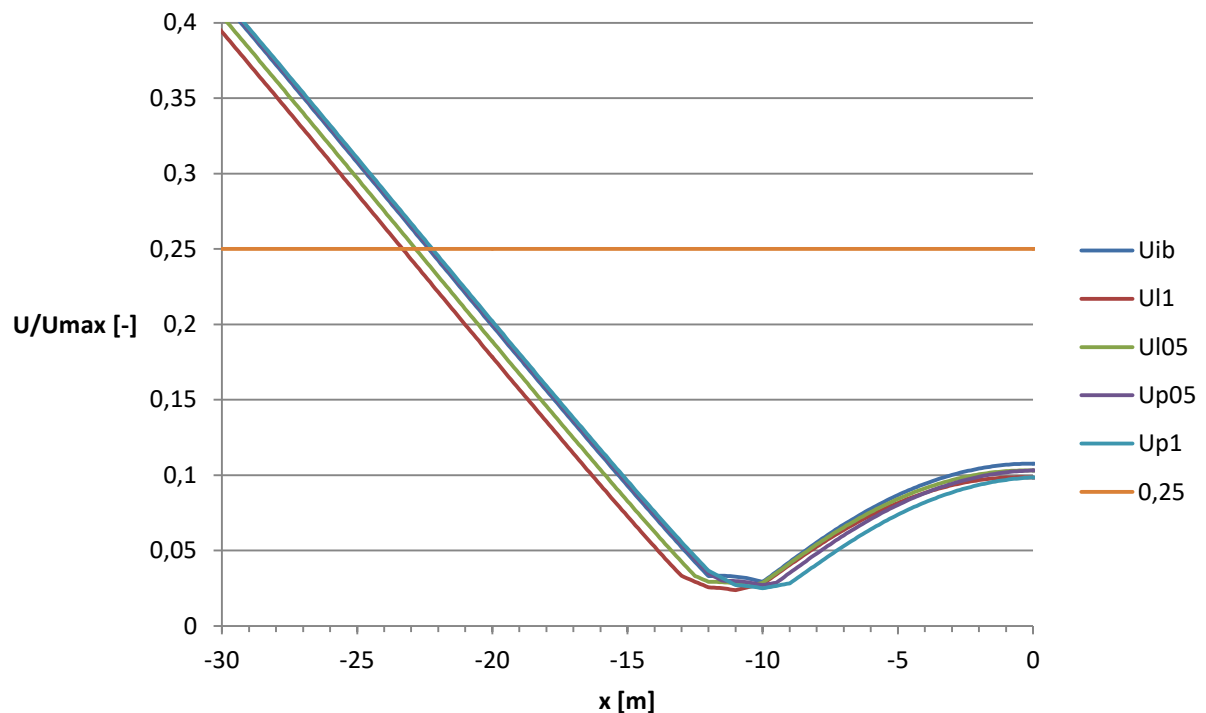
Z těchto dvou má průběh pro 10 kHz menší maximum napětí v oblasti $x \approx 0$, ale průběh pro 20 kHz má ostřejší změnu napětí v oblasti, kdy se vlak blíží k IB. To vede k větší přesnosti při detekci polohy vlaku pro každou zvolenou hodnotu detekční hladiny. Průběh pro 10 kHz sice umožňuje nastavit detekční hladinu níže, a tím docílit stejné přesnosti, je však obecně jednodušší měřit vyšší napětí (v rámci takto malých napětí), a proto byl zvolen jako nejlepší kmitočet 20 kHz



Obrázek 7.4-1: Závislost napětí v IB na poloze vlaku pro 10, 20, 30 a 50 kHz, pro Zs1. Napětí byla normalizována.

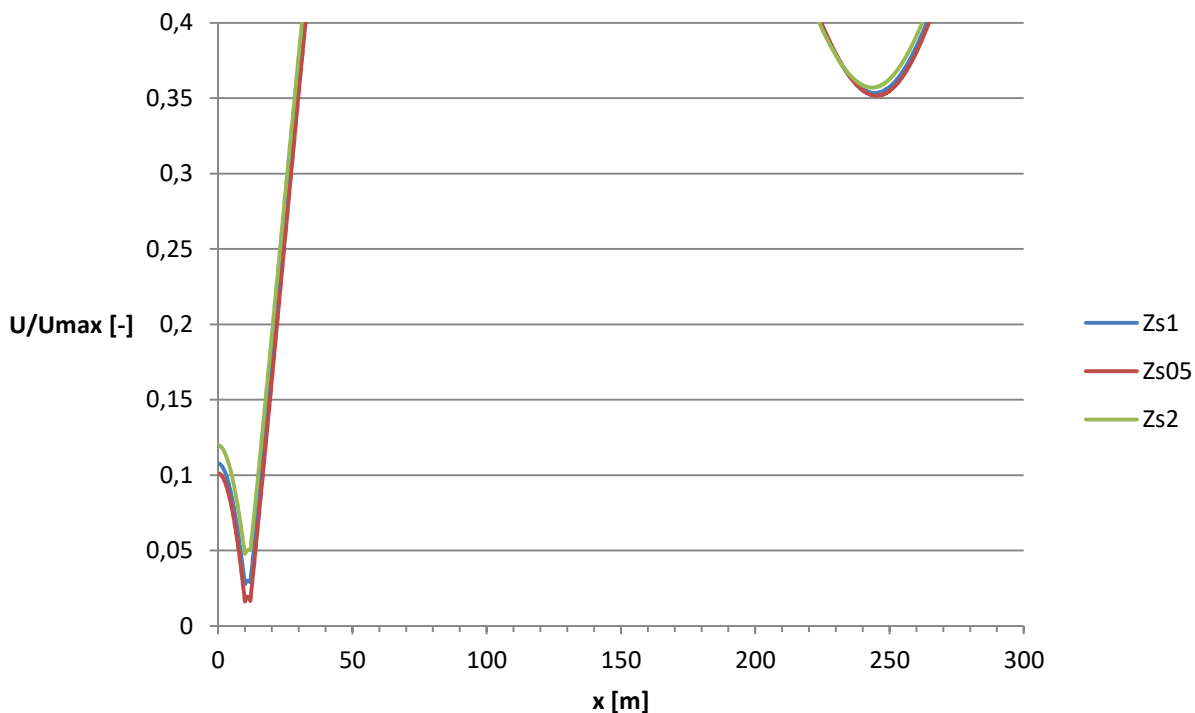
Pro tento kmitočet budou nadále ověřeny další podmínky úspěšné detekce průjezdu vlaku, a to detekce směru. Obrázek 7.4-2 ukazuje průběhy napětí v IB a ve snímacích bodech okolo IB pro průjezd vlaku na 20 kHz, pro výchozí šuntovou impedanci. Hodnoty napětí byly normalizované, aby byl graf srovnatelný s grafem výše. Na grafu je zobrazena navržená dělicí hladina na 0,25 (-). Je vidět, že napětí ve snímacích bodech nalevo od IB dosáhnou této hladiny dříve, než napětí v IB a ve snímacích bodech napravo od IB; čím vzdálenější je snímací bod, s tím větším předstihem této hladiny dosáhne. A pokud se provede vertikální řez například pro $x = -20$ m, je vidět, že napětí ve snímacích bodech nalevo od IB je vždy menší než v IB; čím dále od IB je snímací bod, tím větší je rozdíl v absolutní hodnotě napětí. Pokud by tedy byl rozdíl napětí nebo předstih, se kterým překonají mezní napětí (například kvůli nepřesnosti měření a časové konstantě filtrů, respektive), stačí posunout snímače napětí dále od IB. Vzdálenost snímačů je omezena pouze zespoda rozměry kolejnice a připojení k ní a seshora praktičností měření vysokokmitočtových signálů přes dlouhé přívodní kabely.

Obecně je zde ale platný stejný poznatek, kvůli kterému byly provedeny analýzy v kapitole 7.1, a sice že napětí ve snímacích umístěných blízko IB umožňuje určit směr průjezdu vlaku skrze IB.



Obrázek 7.4-2: Průběhy napětí v IB a ve snímacích bodech 0,5 a 1 m nalevo a napravo IB pro průjezd laku na 20 kHz, Zs1. Napětí je normalizované. Zvýrazněna je hladina napětí, která rozlišuje stav, kdy je vlak blízko IB. U_{ib} značí napětí v informačním bodě, ostatní body jsou značeny U_{xy} , kde x značí umístění snímacího bodu nalevo (l) nebo napravo (p), a y značí vzdálenost snímacího bodu od IB v metrech.

Obrázek 7.4-3 ukazuje průběh napětí v IB v závislosti na poloze vlaku pro 20 kHz, výchozí (Zs1), poloviční (Zs05) a dvojnásobnou (Zs2) impedanci šuntu. Z obrázku je vidět, že velikost šuntové impedance silně ovlivňuje průběh napětí v oblasti kolem $x = 10$ m, kde přes IB projíždí nápravy, ale na zbytku křivky jsou rozdíly mezi jednotlivými impedancemi náprav minimální. Pokud se šuntové impedance budou měnit přibližně ve zkoumaném rozsahu, nebude to mít vliv na schopnost obvodu detekovat průjezd vlaku.



Obrázek 7.4-3: Závislost napětí v IB na poloze vlaku pro 20 kHz, výchozí (Z_{s1}), poloviční (Z_{s05}) a dvojnásobnou (Z_{s2}) impedanci šuntu. Napětí jsou normovaná k maximální hodnotě napětí pro výchozí impedanci šuntu. Rozsahy os jsou zvoleny tak, aby zachytily průběh napětí v oblasti, kdy je vlak v blízkosti IB (kolem $x=0$), a zároveň nejmenší hodnoty napětí, když byl vlak mimo IB (kolem $x=250$) Modrá křivka je totožná s červenou křivkou z Obrázek 7.4-1).

Tato skupina analýz umožnila určit kmitočet, na kterém je možné detekovat průjezd vlaku a jeho směr pouze s použitím absolutní hodnoty snímaných napětí. Tímto kmitočtem je 20 kHz, a při nastavení limitní hladiny napětí pro detekci průjezdu vlaku 0,25 (v poměru k maximálnímu detekovanému napětí) je pro vlak dlouhý 24 m šířka pásma, ve kterém se vlak jeví nad IB, asi 45 m, tedy přibližně o 20 m více než je šíře vlaku.

7.5 Detekce průjezdu každého soukolí – počítání náprav.

Při zpracovávání výsledků analýz si autor všiml, že rozdíly mezi napětími ze snímačů umístěných 0,5 m na každou stranu od IB ($\Delta U_{0,5}$) a napětími ze snímačů umístěných 1 m na každou stranu od IB (ΔU_1) (jak ukazuje Obrázek 10.4-8 v Příloze 4) jsou si průběhem velmi podobné, a to se dvěma rozdíly:

1. Rozdíl napětí $\Delta U_{0,5}$ je pro každou souřadnici poloviční oproti rozdílu napětí ΔU_1 .
2. Rozdíl napětí $\Delta U_{0,5}$ snímá detailně průjezd každého soukolí, zatímco z rozdílu napětí ΔU_1 nelze průjezd dvou soukolí vzdálených 2 m od sebe rozlišit.

Pro zjištění rozdílů mezi dvěma umístěními snímačů byl vynesena průběh takto vypočtené veličiny:

$$A = \Delta U_1 - 2 \cdot \Delta U_{0,5} \quad (53)$$

Kde ΔU_1 je rozdíl mezi napětími ze snímačů umístěných 1 m na každou stranu od IB.

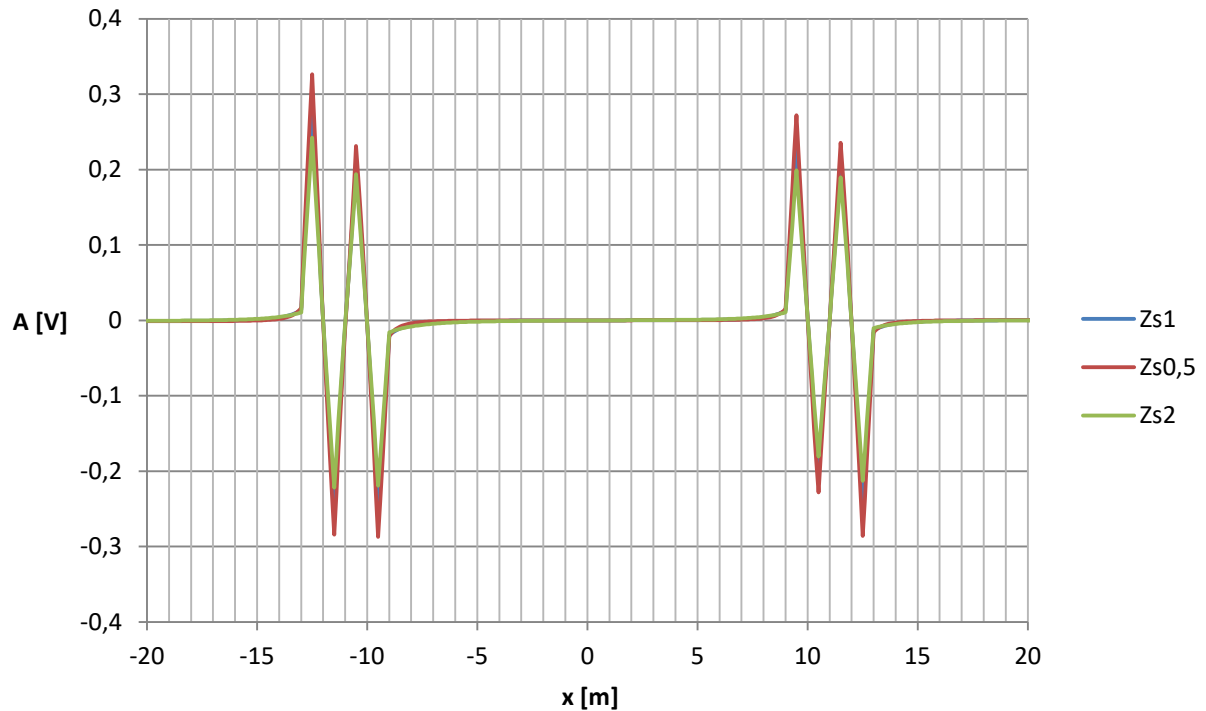
$$\Delta U_1 = U_{l1} - U_{p1} \quad (54)$$

$\Delta U_{0,5}$ je rozdíl mezi napětími ze snímačů umístěných 0,5 m na každou stranu od IB.

$$\Delta U_{0,5} = U_{l0,5} - U_{p0,5} \quad (55)$$

Kde U_{11} je napětí snímače umístěného 1 m nalevo od IB.
 U_{p1} je napětí snímače umístěného 1 m napravo od IB.
 $U_{10,5}$ je napětí snímače umístěného 0,5 m nalevo od IB.
 $U_{p0,5}$ je napětí snímače umístěného 0,5 m napravo od IB.

Průběh veličiny A pro výše diskutovanou analýzu na 20 kHz pro tři analyzované impedance šuntu ukazuje Obrázek 7.5-1. V oblastech $x = \pm(20 \div 400 \text{ m})$ je A velice blízko nule. Je vidět, že každý šunt se vyznačuje impulzem jedné polarity, který hned následuje impulz opačné polarity. Ze sledu polarit pak lze určit směr průjezdu šuntu.



Obrázek 7.5-1: Závislost veličiny A na poloze středu vlaku pro 20 kHz, pro tři různé impedance šuntu (pozn. průběh $Zs1$ se nachází přibližně uprostřed mezi $Zs0,5$ a $Zs2$).

Protože kratší vzdálenost mezi šuntů vlaku je 2 m, a délka každé dvojice (kladný a záporný) je 2 m, signály pro dvě blízká soukolí na sebe okamžitě navazují. Proto pokud by vlak projel první dvojicí impulzů a pak se zastavil na navazujícím kladném impulzu a následně se rozjel směrem zpět, mohly by dojít k mylné detekci průjezdu vlaku směrem vpřed a vzniku nebezpečné situace.

Proto nelze tuto veličinu použít samostatně k detekci průjezdu vlaku. Je však možné ji použít v podřadné úloze vůči systému detekce popsanému v předchozí kapitole, a to jako doplňkový prostředek umožňující počítání náprav a tím například kontrolu celistvosti vlaku Průběh veličiny A je třeba ověřit na terénním měření.

V této kapitole bylo provedeno velké množství analýz průjezdu vlaku kolem IB na vysokých kmitočtech. Vytvořil jsem nové algoritmy, které tuto již řešenou úlohu umožňují řešit pro mnohem větší rozsah vlaků, s mnohem menším krokem a zároveň měřit napětí v okolí IB. Nic z toho v původním řešení možné nebylo. Navíc jsem provedl laboratorní měření parametrů transformátoru DT 0,75 a tlumivky SYT pro vysoké kmitočty. V závěru kapitoly jsem určil kmitočet, na kterém je možné snadno detekovat průjezd vlaku přes IB a navrhl způsob, jak detekovat průjezd jednotlivých soukolí.



8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést obvodové analýzy nového typu kolejových obvodů vyvíjeného firmou AŽD Praha, s.r.o. Díky tomu se autor seznámil s modelováním a metodikou obvodových analýz kolejových obvodů v programu Maple s využitím knihovny PraCAN.

V první části se práce věnuje klasifikaci kolejových obvodů a způsobům jejich modelování. Potom popisuje modelování neohraničeného kolejového obvodu pro analýzu volného stavu, šuntového stavu a havarijního stavu. Také se zabývá modelováním kolejového obvodu včetně modelu vlaku pro analýzu průjezdu vlaku kolem informačního bodu. Nakonec se v této části zpráva věnuje rešerši modelování odporu půdy okolo kolejového obvodu a modelováním zemního lana.

V další části se práce zabývá zjištěním parametrů potřebných pro analyzování KO. Většina parametrů je převzata z výzkumných zpráv doc. Hospodky a Ing. Marka [26, 28, 13, 27]. Parametry pro modelování zemního lana a odporu půdy v analýze HS jsou zjištěny analytickými výpočty. Parametry pro model transformátoru pro stykový transformátor DT 0,75 a symetrizační tlumivku SYT na vysokých kmitočtech jsou zjištěny laboratorním měřením, jehož metodika je ověřena srovnáním s předchozími měřeními na nízkých kmitočtech.

V poslední části jsou dosavadní poznatky použity při provedení analýz volného, šuntového a havarijního stavu. Část těchto analýz opakuje již provedené analýzy, a díky tomu je možné tyto analýzy ověřit srovnáním s výzkumnými zprávami. Tyto analýzy popisují kapitoly 5.1 až 5.5 a kapitola 6.

V návaznosti na tyto jsem provedl nové analýzy. Jedná se o analýzu havarijního stavu s modelováním impedance zemního lana a odporu půdy a o analýzu havarijního stavu s uvažováním nevodivých pražců.

Z těchto zejména analýza, která modeluje zemní lano a odpor země, podstatně přiblížila analýzu havarijního stavu skutečnosti. Ukázala, že skutečné proudy, které budou indikovat HS, budou podstatně menší, než jak to vycházelo z původní analýzy, při které bylo uvažováno dokonale vodivé spojení středů kolejových vinutí všech transformátorů a tlumivek.

Provedl jsem také analýzu průjezdu vlaku kolem IB na 50 kHz se snímáním hodnot napětí mimo IB a tuto analýzu jsem přepracoval tak, aby bylo možné zvolit libovolný krok analýzy a libovolné vzdálenosti mezi šuntů vlaku. Posléze jsem vytvořil variantu této analýzy pro napěťové napájený IB a několik variant pro napájení na frekvenci 10, 20, 30 a 50 kHz. Nakonec jsem navrhl způsob, jakým je možné ze snímaných průběhů napětí mezi kolejnicemi v blízkosti IB detekovat průjezd jednotlivých náprav přes IB. Všechny tyto analýzy jsem provedl pro několik variant velikosti impedance šuntů jednotlivých náprav.

Tyto analýzy ukázaly, že je možné použít napájení IB na vysokých frekvencích pro zajištění ohraničenosti kolejového obvodu bez izolovaných styků. To je u nižších frekvencí mezi 10 a 20 kHz možné zajistit pouze na základě velikosti napětí v IB a v jeho blízkosti; u všech frekvencí v rozsahu 10 ÷ 50 kHz je pak ohraničení možné zajistit na základě algoritmu, který vyvinul doktor Sadil. Dále byl díky těmto analýzám jako nejhorší případ určen průjezd vlaku, který má mezi jednotlivými nápravami velkou vzdálenost. Poté bylo ověřeno, že pro maximální možnou vzdálenost dvou náprav, která je v Evropě 20 m, je stále možné průjezd vlaku bezpečně detekovat. Detekce průjezdu každé nápravy pak může sloužit například ke kontrole celistvosti vlaku.

V další výzkumné práci je třeba ověřit metodiku provedených analýz na experimentu v reálném kolejišti. Tento experiment je připravován, ale ještě k němu nedošlo.



9 CITOVANÁ LITERATURA

- [1] V. Chudáček, Detekce kolejových vozidel v železniční zabezpečovací technice, 2. editor, Praha: VÚŽ, 2005.
- [2] O. Poupě, Zabezpečovací technika v železniční dopravě II, 1. editor, J. Ojčík, Editor, Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1990, p. 676.
- [3] J. Pavlas, Zabezpečovací technika v dopravě, Brno: Code Creator, 2015.
- [4] A. Faran, Paralelní kolejové obvody České republiky a Slovenské republiky a jejich proudová kompatibilita s drážními vozidly, Praha: AŽD Praha, s.r.o., 2008.
- [5] Siemens AG, „Clearguard FTGS and Clearguard FTGS EZS remote-fed coded audio-frequency track circuits,“ Siemens, AG, Mnichov, 2012.
- [6] Ansaldo STS, „Track circuits,“ Ansaldo STS, [Online]. Available: <http://www.ansaldo-sts.com/en/business/business-segments/equipment-components>. [Přístup získán 24 5 2018].
- [7] Siemens AG, „Frequency track circuit,“ Siemens AG, 2018. [Online]. Available: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/urban-mobility/rail-solutions/rail-automation/signaling-products/frequency-track-circuit/pages/frequency-track-circuit.aspx>. [Přístup získán 22 5 2018].
- [8] Siemens Rail Automation Pty Ltd, „FS2550 Mk II Jointless Track Circuits,“ Siemens Rail Automation Pty Ltd, Vistoria, 2018.
- [9] J. Hospodka, „Studie modelování a analýzy kolejových obvodů,“ Interní výzkumná zpráva FEL, Praha, 2016.
- [10] J. Bičák a J. Hospodka, *PraCan - Maple Package for Symbolic Circuit Analysis*, Žilina: University of Žilina, Faculty of electrical engineering, 2008.
- [11] Maplesoft, *Maple*, 2017.
- [12] J. Hospodka, „Modelování neohrazených kolejových obvodů a analýzy volného a šuntového stavu,“ Interní výzkumná zpráva ČVUT FEL, Praha, 2016.
- [13] J. Hospodka, „Analýza neohrazených kolejových obvodů ve volném a šuntovém stavu při různých konfiguracích a kmitočtech,“ Interní výzkumná zpráva ČVUT FEL, Praha, 2017.
- [14] J. Hospodka a J. Marek, „Analýza neohrazených kolejových obvodů ve volném, šuntovém a havarijním stavu,“ Výzkumná zpráva ČVUT FEL, Praha, 2016.
- [15] B. Sedlák a I. Štoll, *Elektřina a magnetismus*, B. Sedlák, Editor, Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2012.
- [16] Geek3, „VFPT charges plus minus thumb.svg,“ 2010.
- [17] V. Pankrác, P. Hazdra a K. Novotný, „Teorie elektromagnetického pole - příklady,“ Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT, Praha.

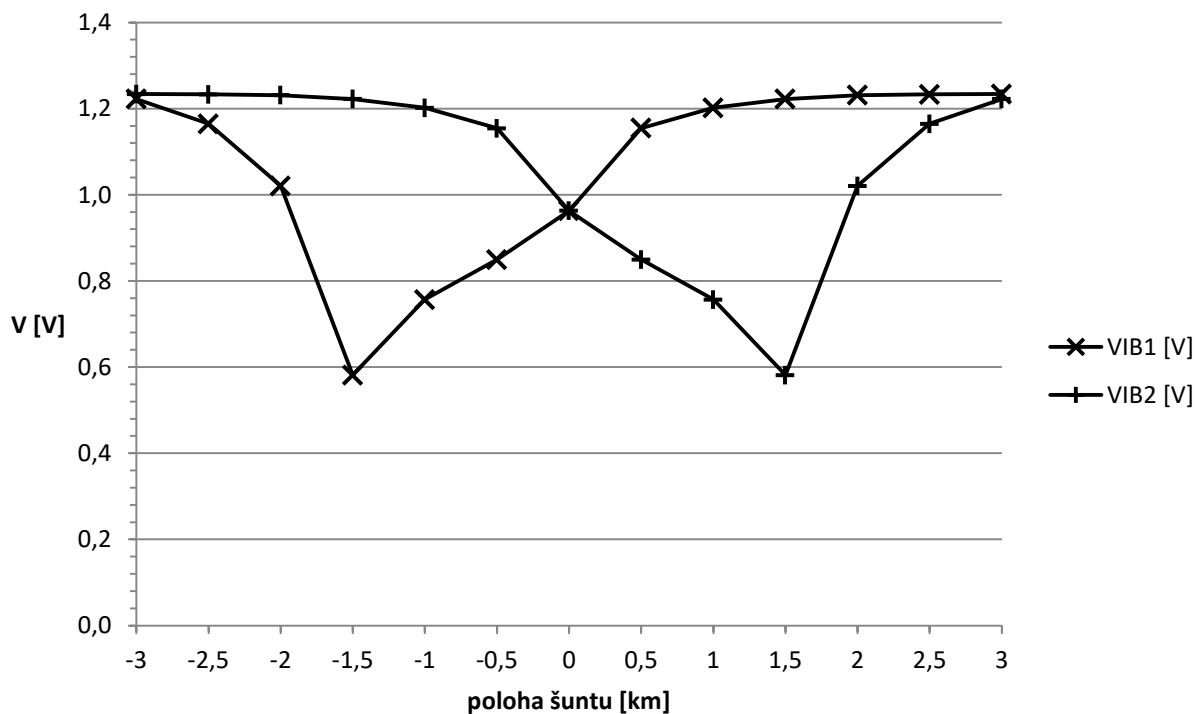


- [18] ČSN EN 60228 Jádra izolovaných kabelů, Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [19] W. Highton, „Calculator for ac Resistance of a Round Straight Wire,“ CHEMANDY ELECTRONICS Ltd, 30 9 2011. [Online]. Available: <http://chemandy.com/calculators/round-wire-ac-resistance-calculator.htm>. [Přístup získán 18 4 2018].
- [20] V. Pankrác, *email z 8.11.2017*, Praha, 2017.
- [21] E. B. Rosa, „the Self and Mutual Inductances of Linear Conductors,“ *Bulletin of the Bureau of Standards*, sv. 4, č. 2, pp. 301-344, 15 9 1907.
- [22] Z. Fejt a J. Čermák, *Elektroenergetika*, Praha: Skripta ČVUT, 1985.
- [23] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, J. A. Martinez-Velasco, Editor, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010.
- [24] N. Karel, *Teorie elektromagnetického pole I*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998, p. 174.
- [25] J. P. Holman, „Heat Transfer,“ McGraw-Hill, New York, 2010.
- [26] P. Máša a J. Hospodka, „Měření parametrů SYT,“ Interní výzkumná zpráva ČVUT FEL, Praha, 2016.
- [27] J. Marek, „Měření parametrů transformátoru DT-0,75E,“ Interní výzkumná zpráva ČVUT FEL, Praha, 2017.
- [28] J. Marek, „Aproximace naměřených hodnot prvků modelu transformátoru SYT,“ Interní výzkumná zpráva ČVUT FEL, Praha, 2017.
- [29] M. Šesták, „Měření čtyřpólových přenosových parametrů stykového transformátoru,“ Informativní zkouška, AŽD Praha s.r.o., Výrobní závod Brno, Brno, 2017.
- [30] Stramon, „Metodika měření čtyřpólových přenosových parametrů stykových transformátorů“.
- [31] J. Sadil, „Tabulka výpočtu parametrů svršku,“ Interní materiál týmu NKO, ČVUT FD, Praha, 2017.
- [32] A. Chiappini, „Interfaces between control-command and signalling trackside and other subsystems,“ European Rail Agency.

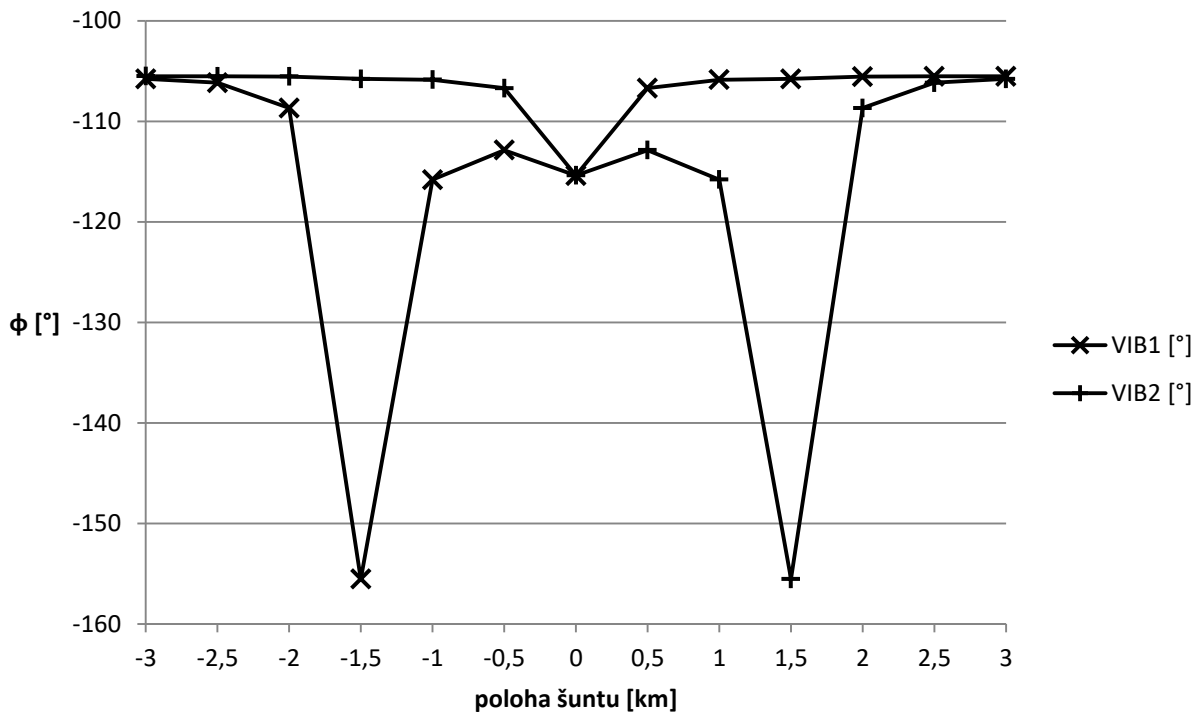
10 PŘÍLOHY

10.1 Výsledky hrubé analýzy šuntového stavu s článkovým modelem pro $f = 75 \text{ Hz}$, $R_s = 0,1 \Omega$, $Y = 0,5 \text{ S}$

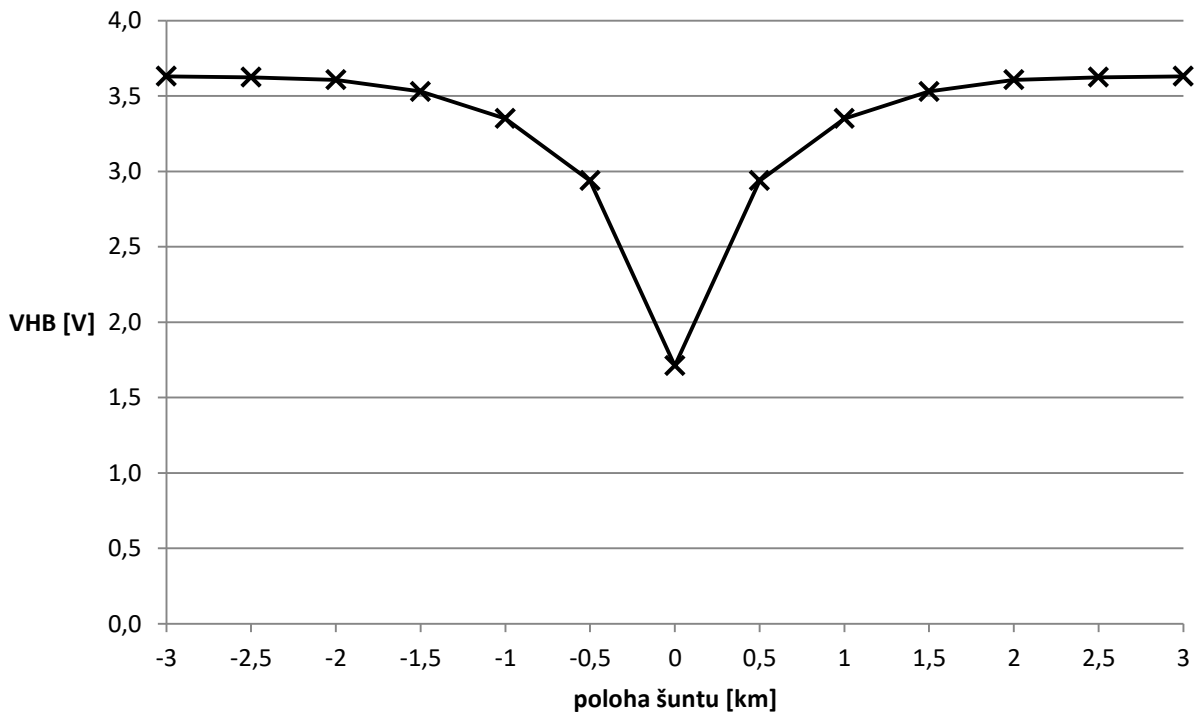
Proudy v napáječích jsou vždy orientovány směrem do horní koleje, napětí jsou orientovány směrem z horní koleje do spodní koleje. Parametry, za kterých byly získány tyto výsledky, popisuje kapitola 5.2.



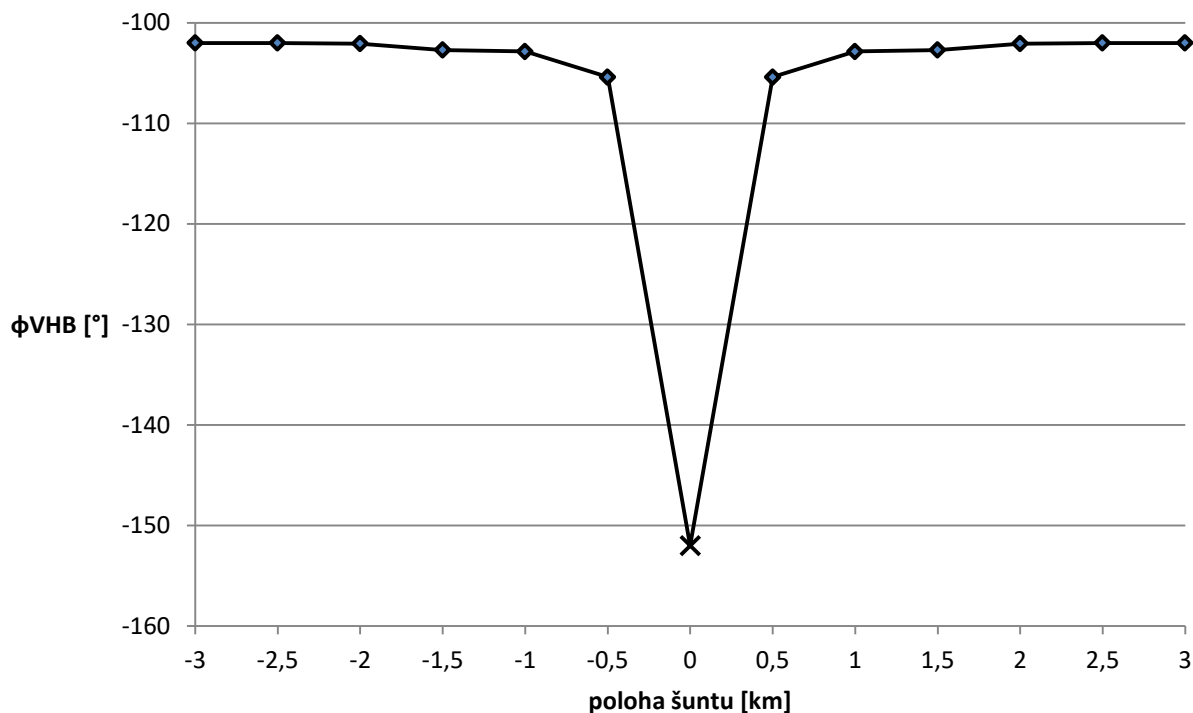
Obrázek 10.1-1: Závislost amplitudy napětí v informačních bodech na poloze šuntu



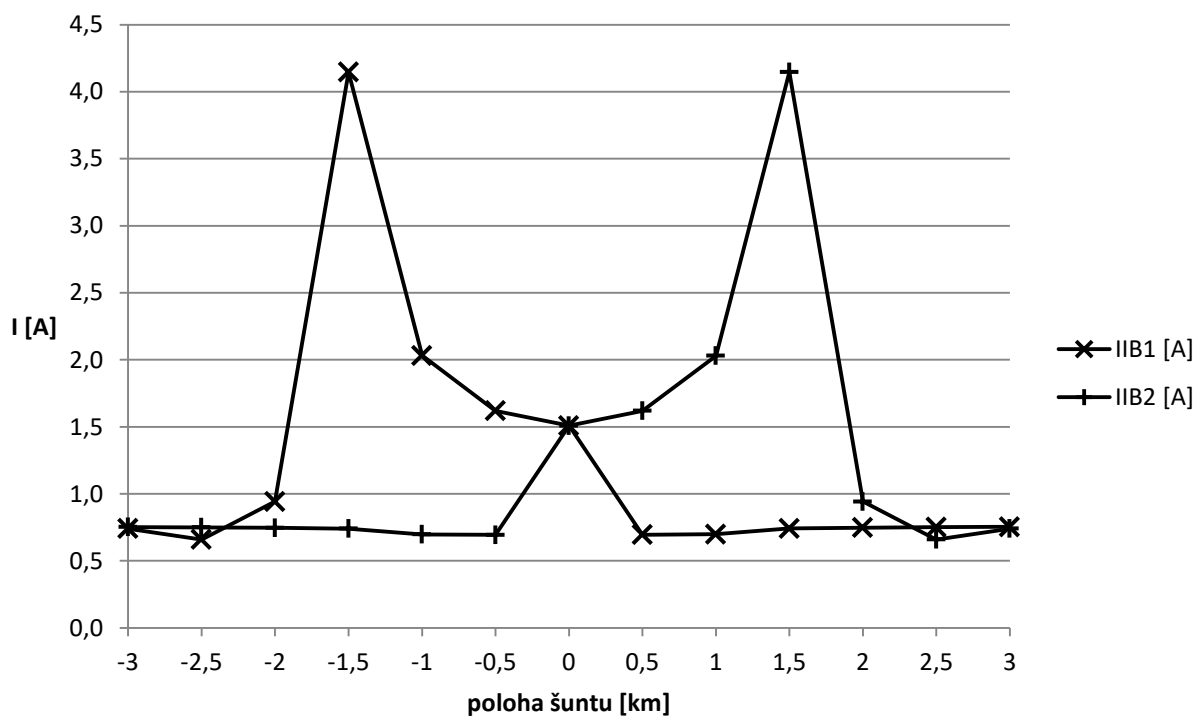
Obrázek 10.1-2: Závislost fáze napětí v informačních bodech na poloze šuntu



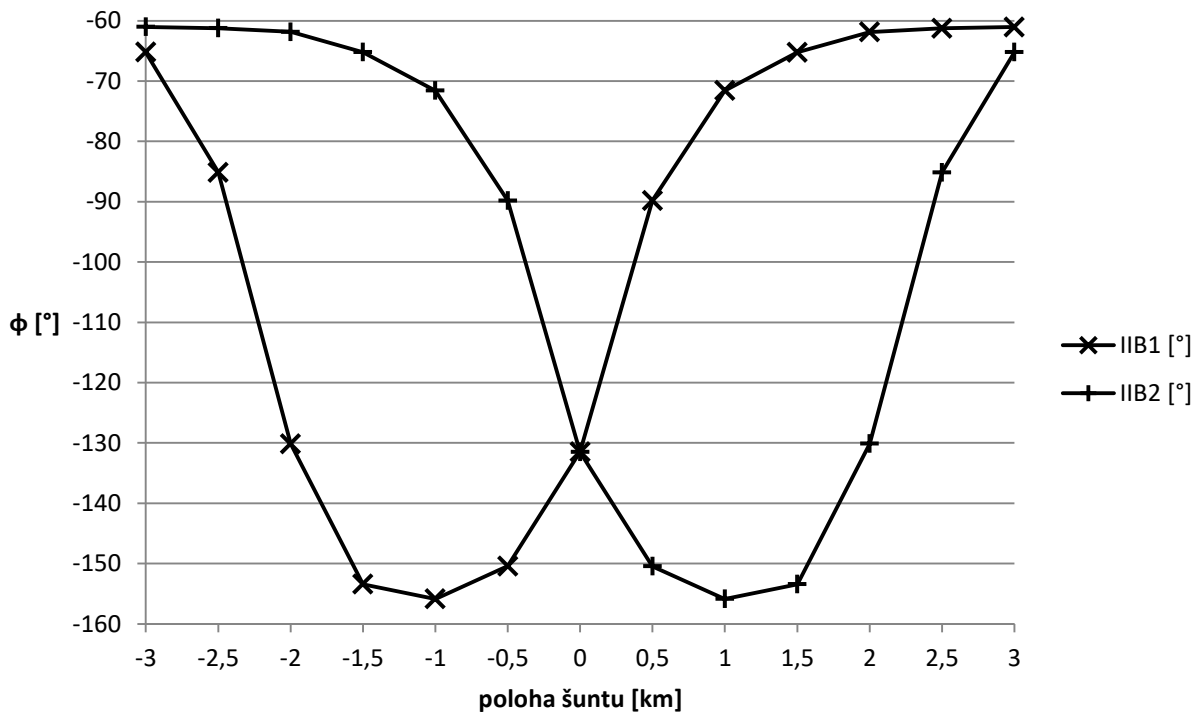
Obrázek 10.1-3: Závislost amplitudy napětí v hlavním bodě na poloze šuntu



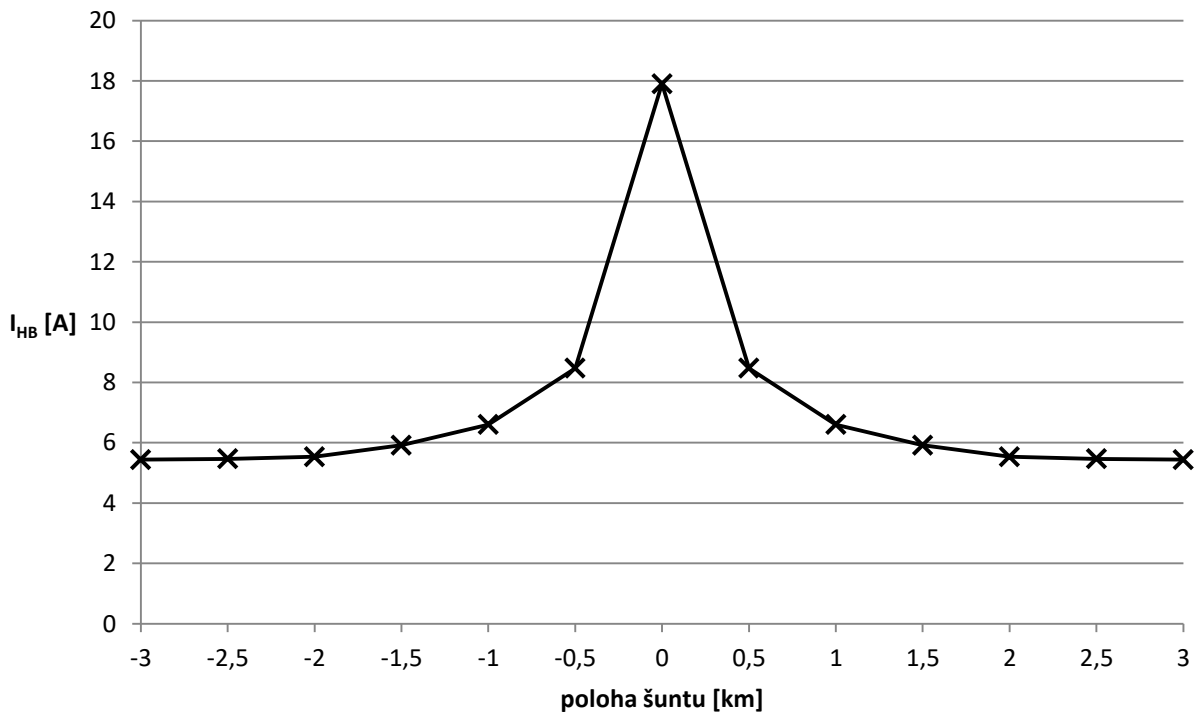
Obrázek 10.1-4: Závislost fáze napětí v hlavním bodě na poloze šuntu



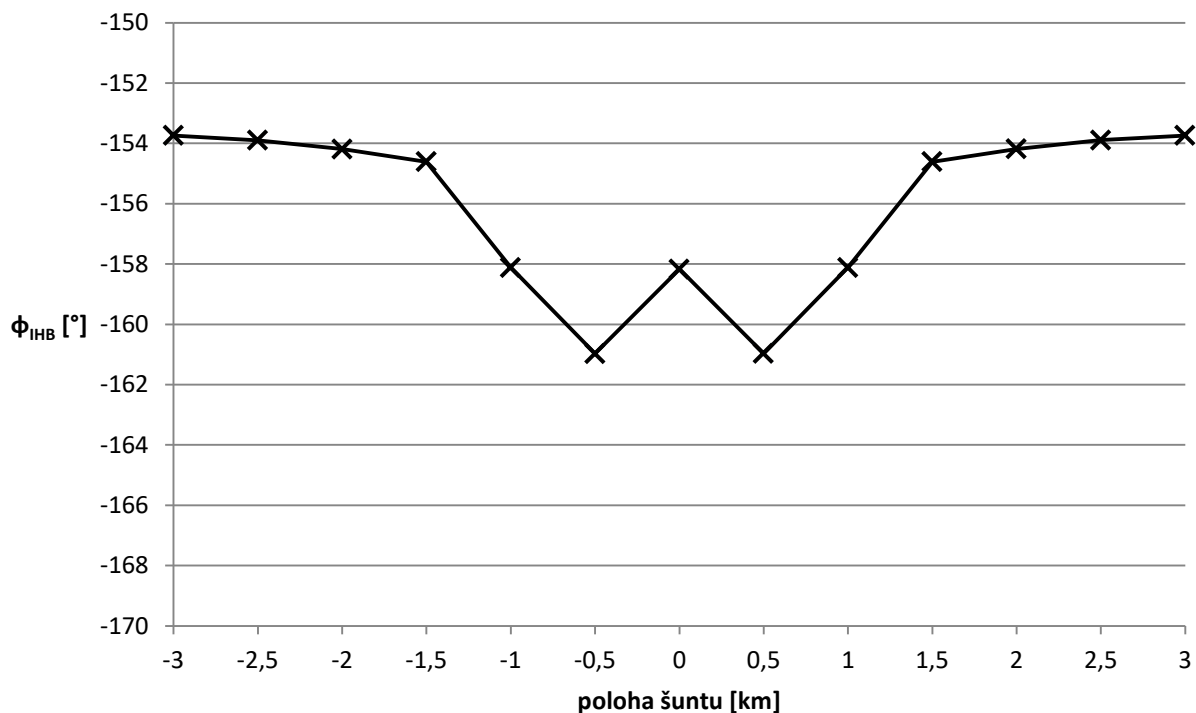
Obrázek 10.1-5: Závislost amplitudy proudu v informačních bodech na poloze šuntu



Obrázek 10.1-6: Závislost fáze proudu v informačních bodech na poloze šuntu

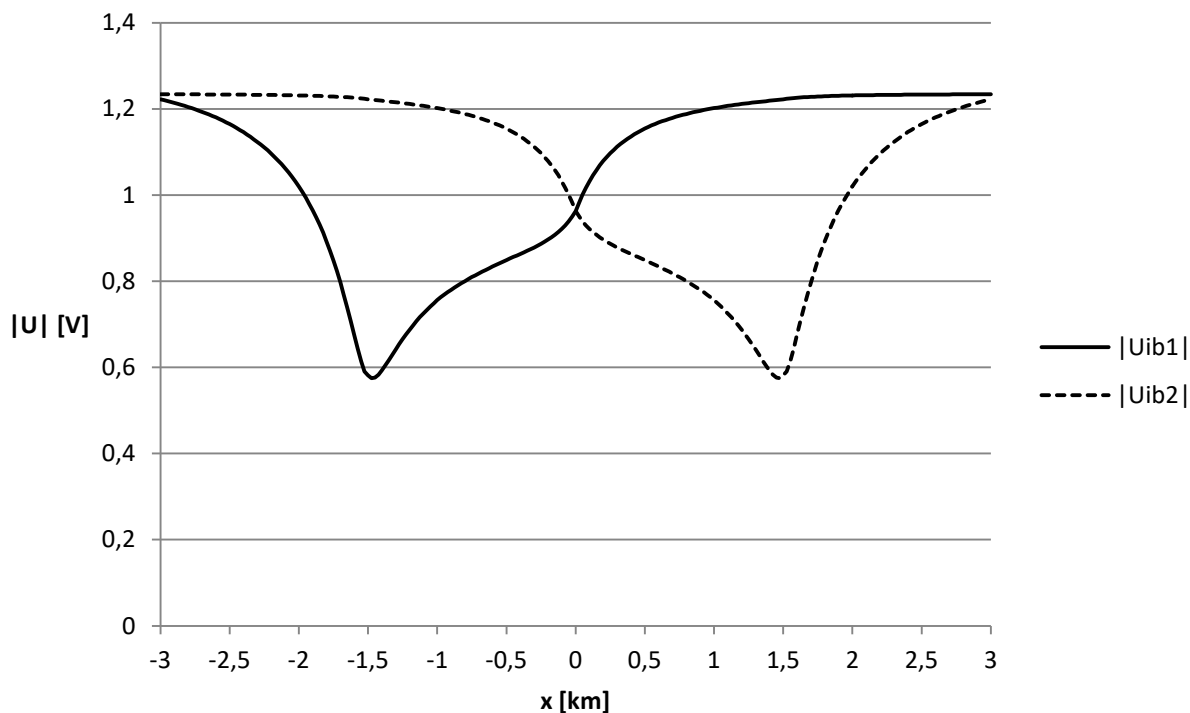


Obrázek 10.1-7: Závislost amplitudy proudu v hlavním bodě na poloze šuntu

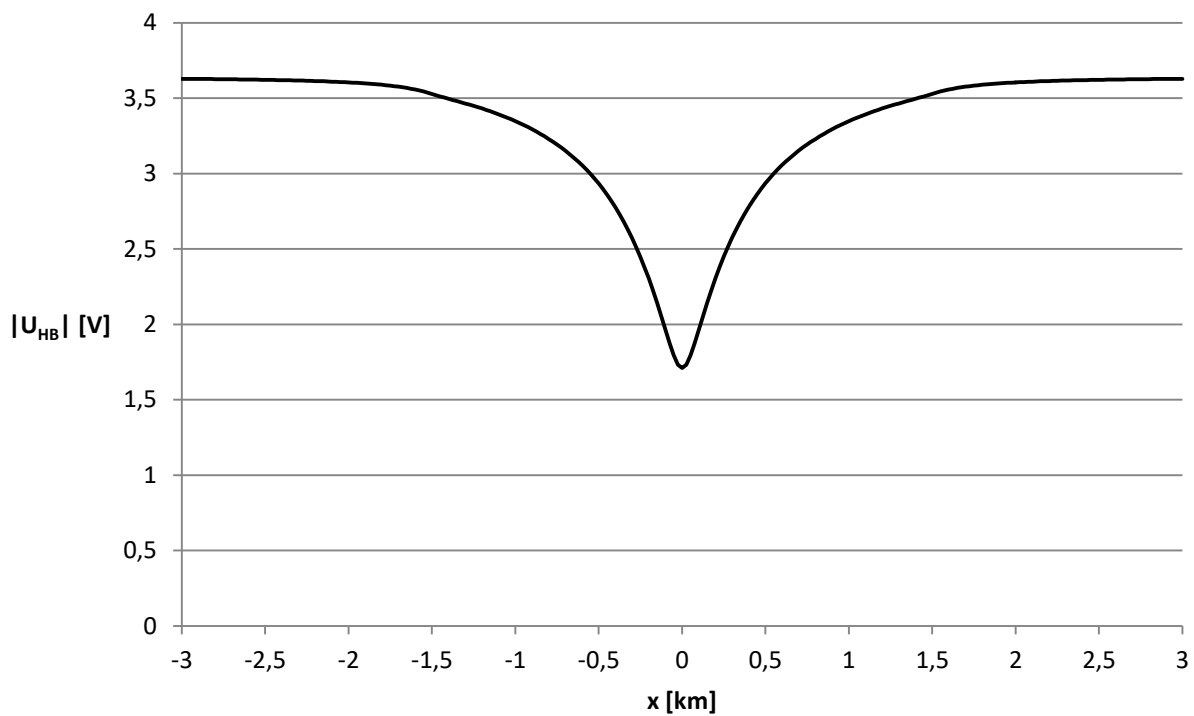


Obrázek 10.1-8: Závislost fáze proudu v hlavním bodě na poloze šuntu

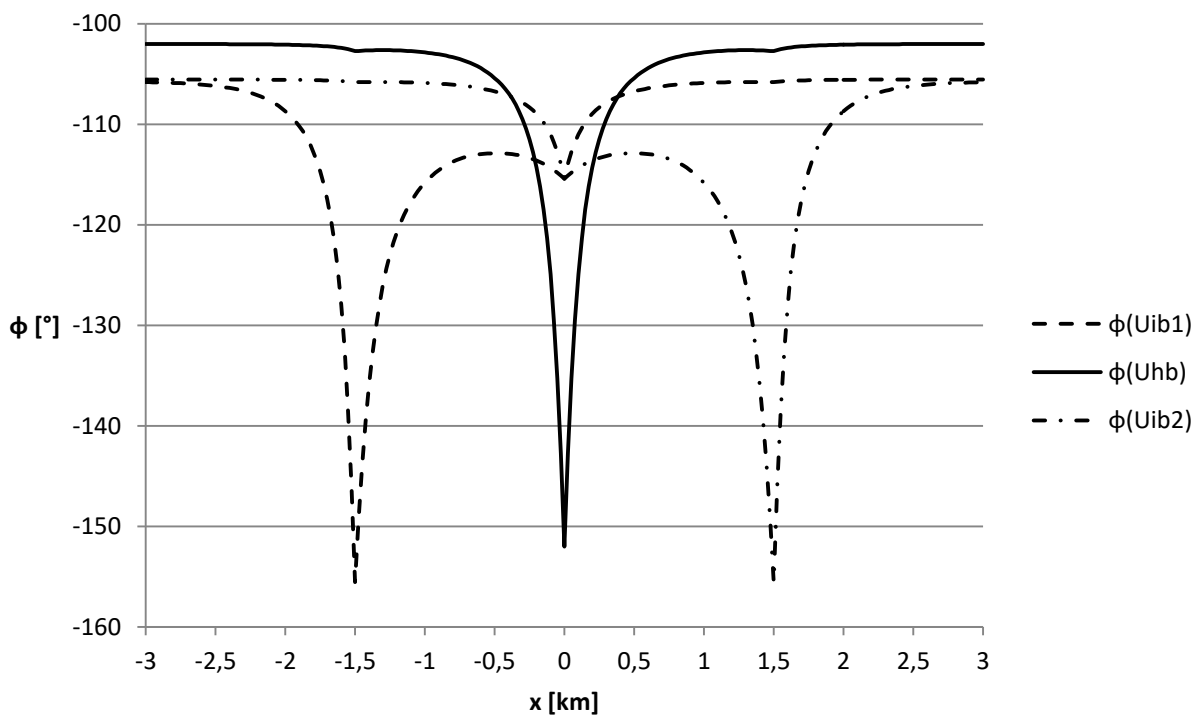
10.2 Výsledky podrobné analýzy šuntového stavu pomocí dvojbranového modelu pro $f = 75 \text{ Hz}$, $Y = 0,5 \text{ S}$, $R_s = 0,1 \Omega$



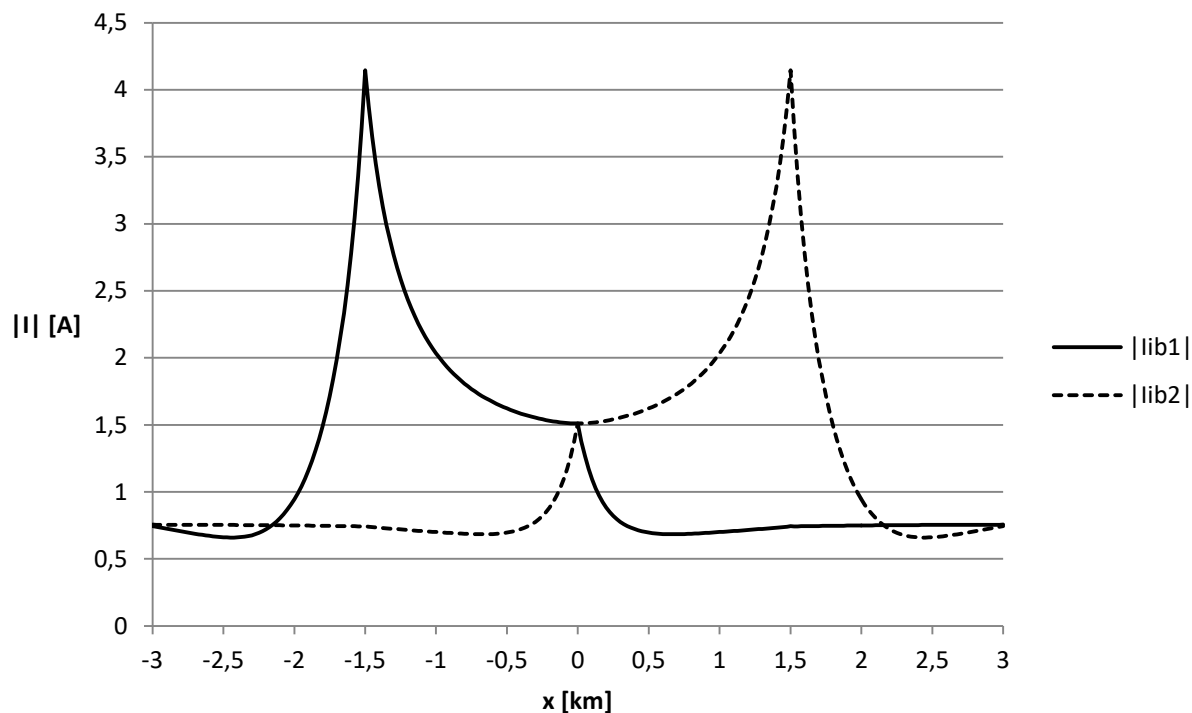
Obrázek 10.2-1: Amplitudy napětí v informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu



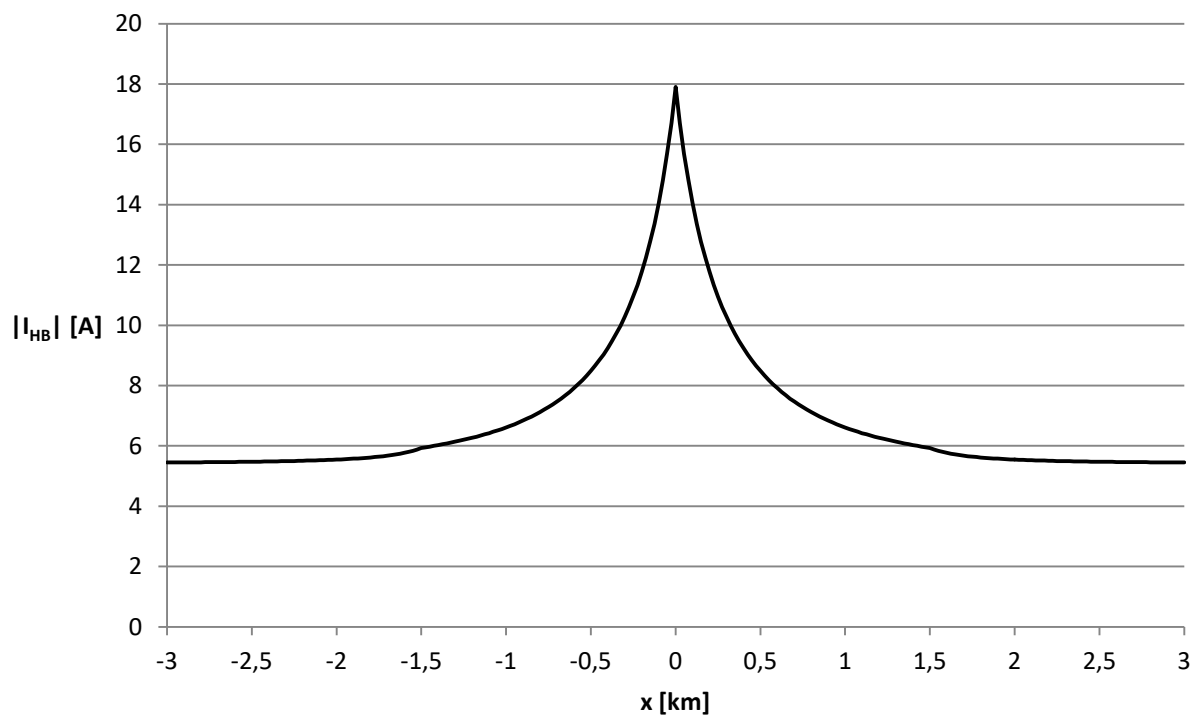
Obrázek 10.2-2: Amplituda napětí v hlavním bodě v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu



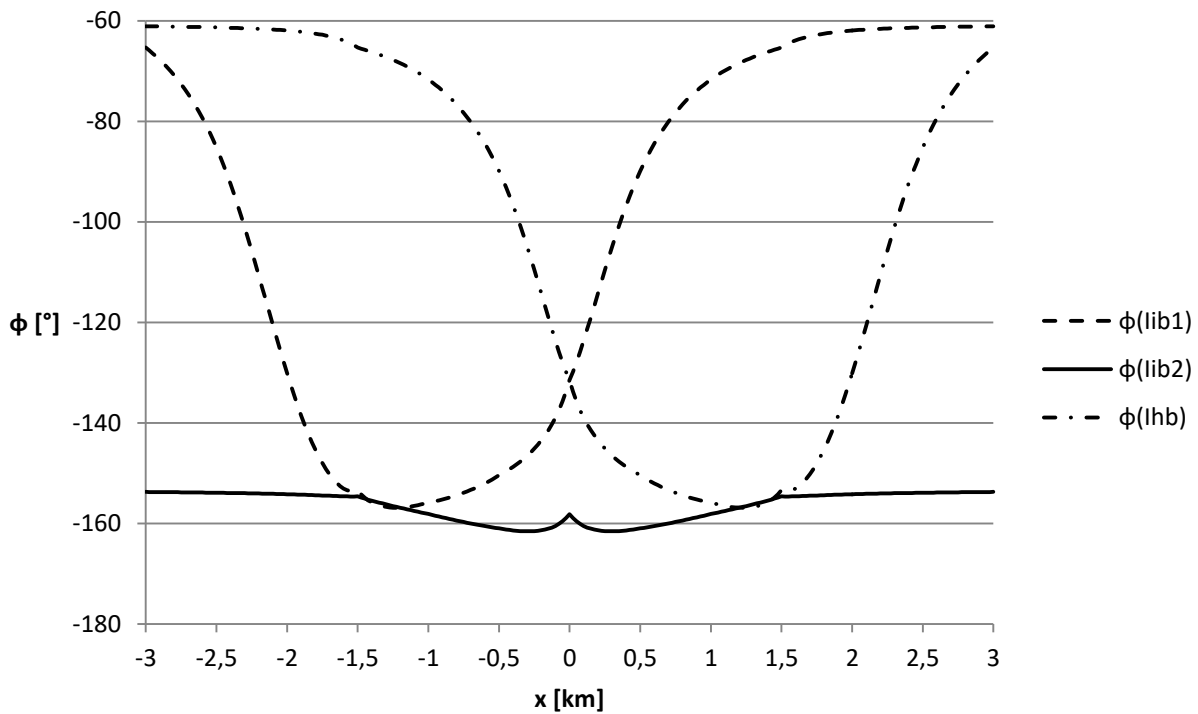
Obrázek 10.2-3: Fáze napětí v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu



Obrázek 10.2-4: Amplitudy proudů v informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu



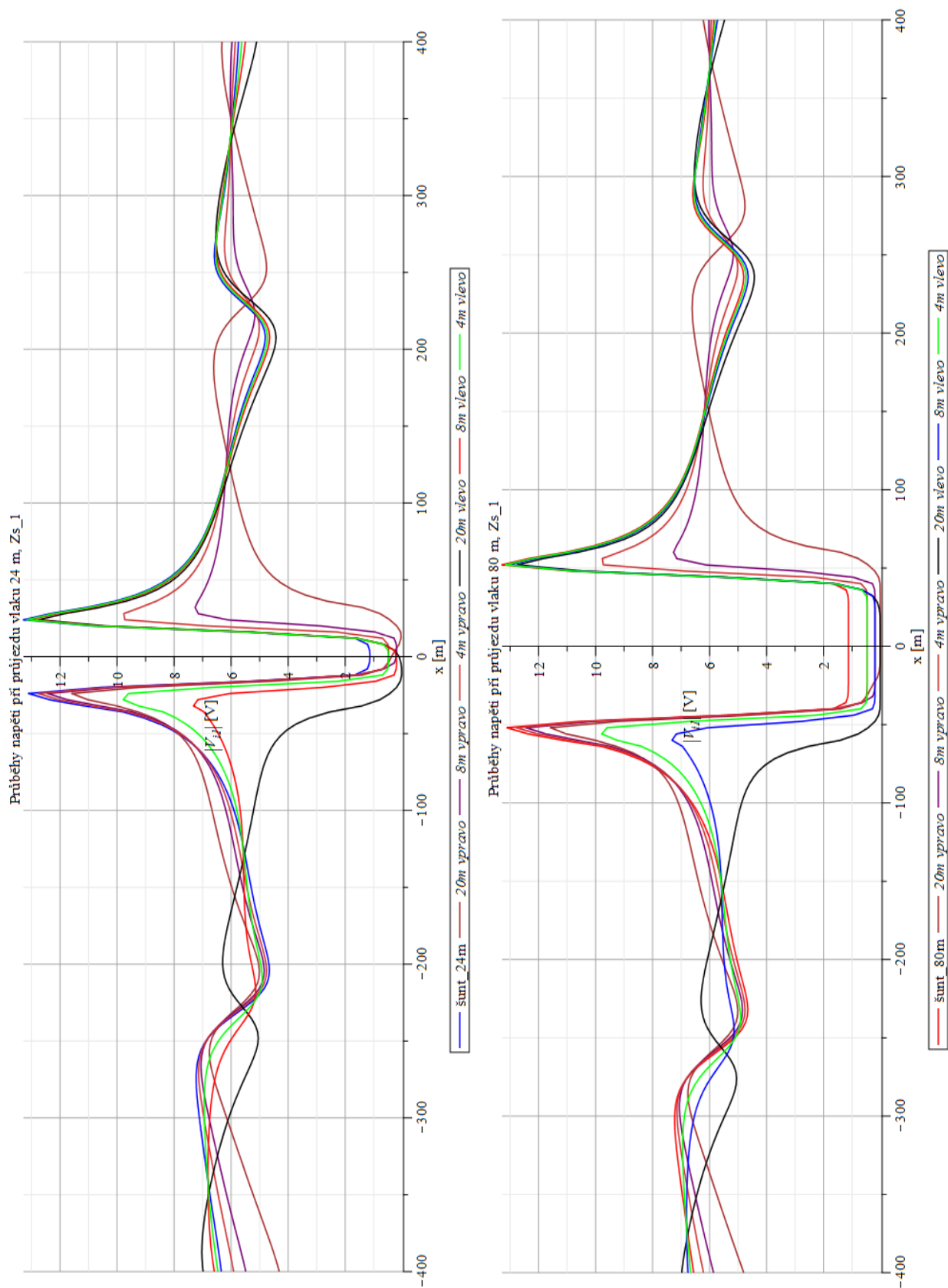
Obrázek 10.2-5: Amplituda proudu v hlavním bodě v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu



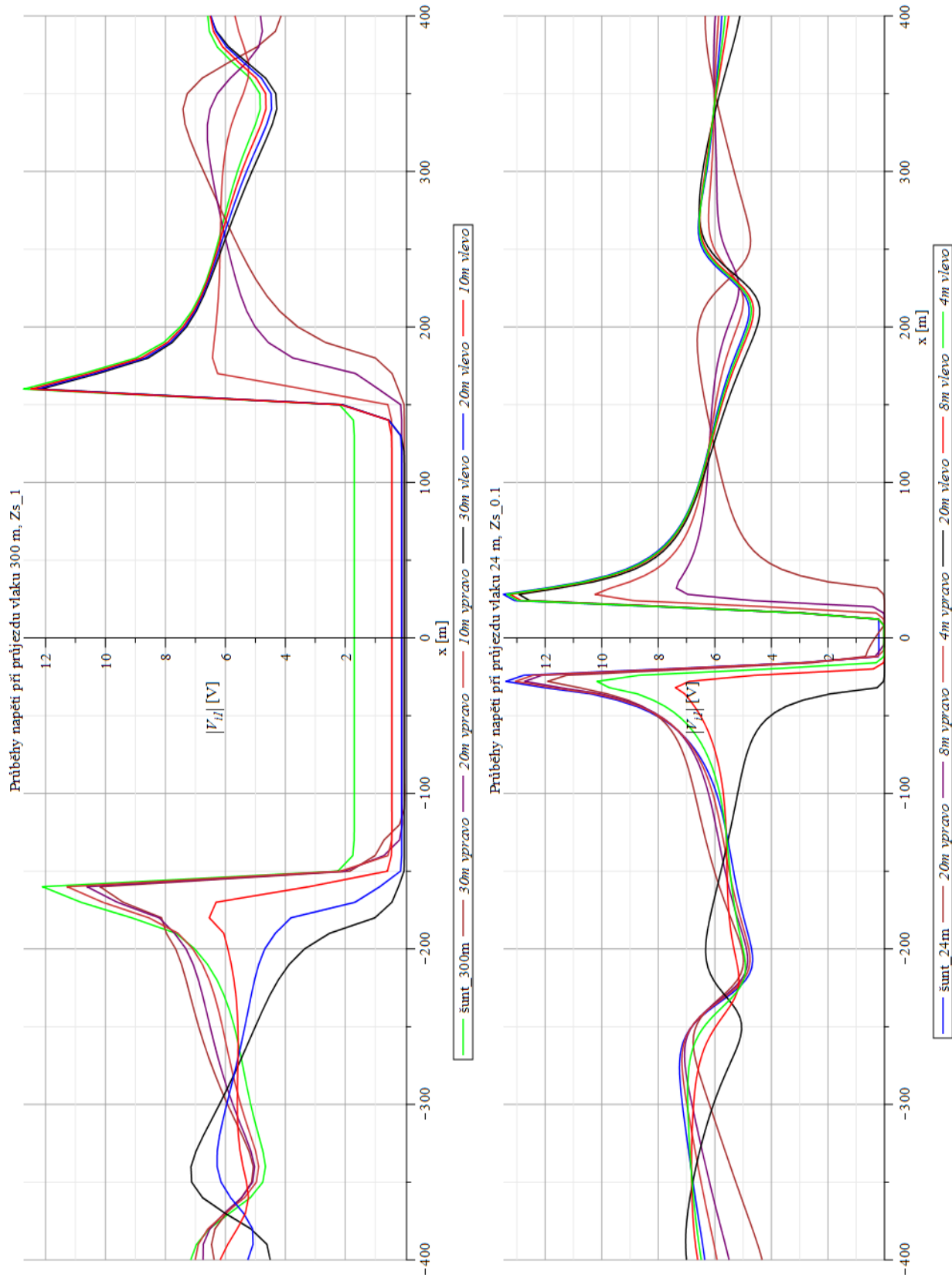
Obrázek 10.2-6: Fáze proudů v hlavním a informačních bodech v závislosti na poloze šuntu pro podrobnou analýzu šuntového stavu

10.3 Výsledky simulace průjezdu vlaku kolem IB při frekvenci napájení 50 kHz

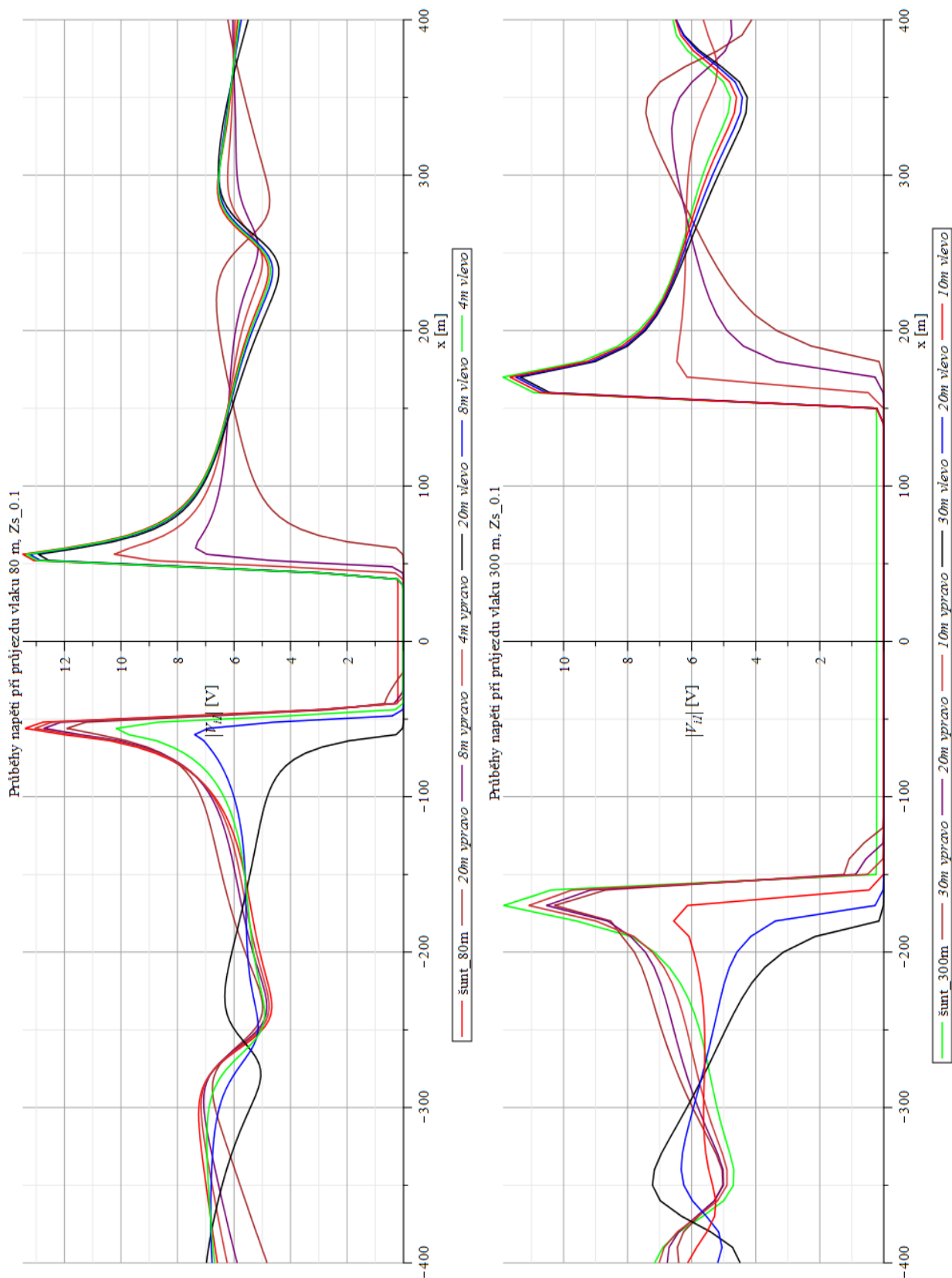
Na všech grafech je vyneseno napětí v IB a v daných vzdálenostech napravo a nalevo od něj v závislosti na poloze středu vlaku (x).



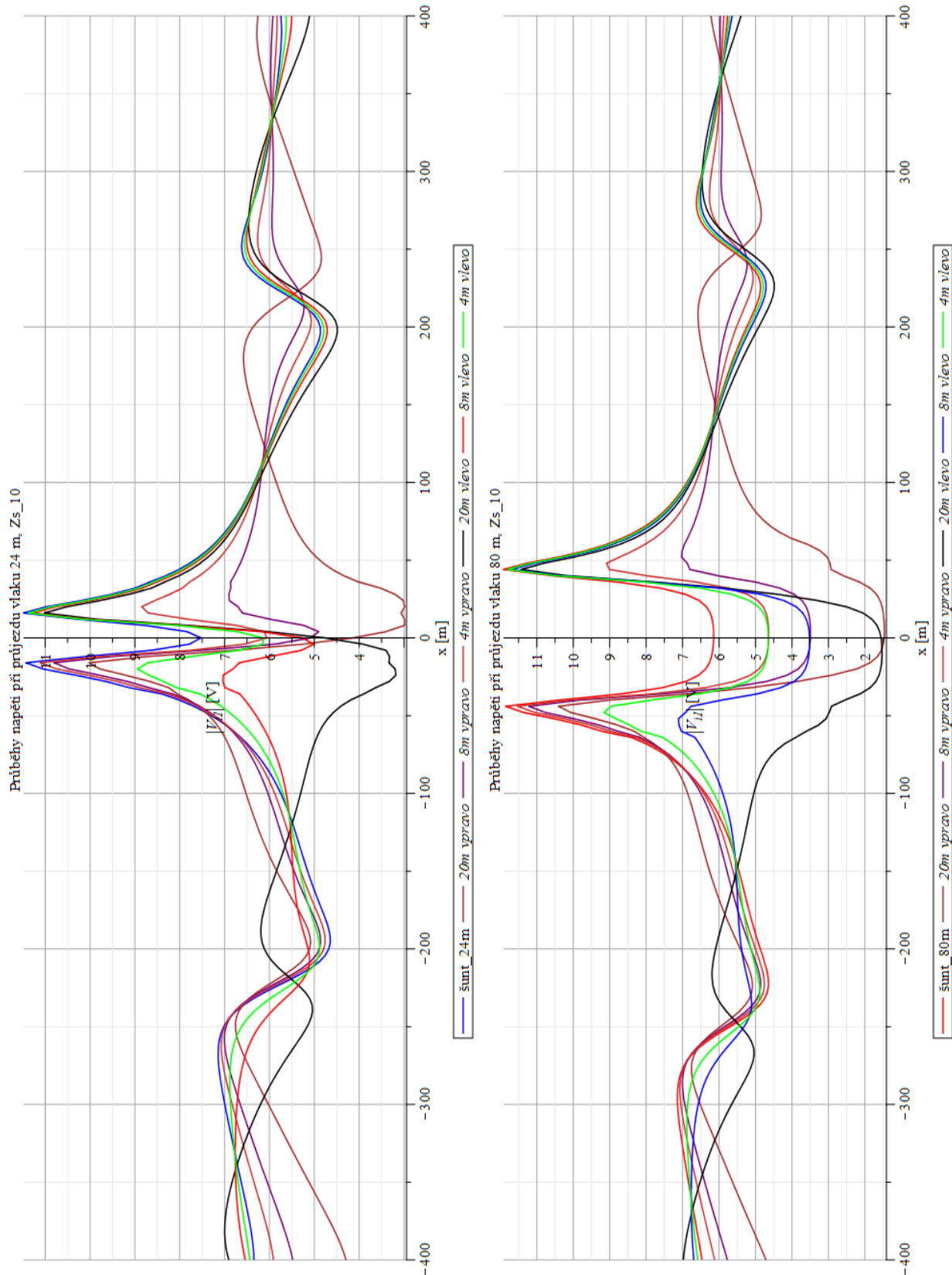
Obrázek 10.3-1: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m (vlevo) a 80 m (vpravo), šuntová impedance odpovídá změřené hodnotě.



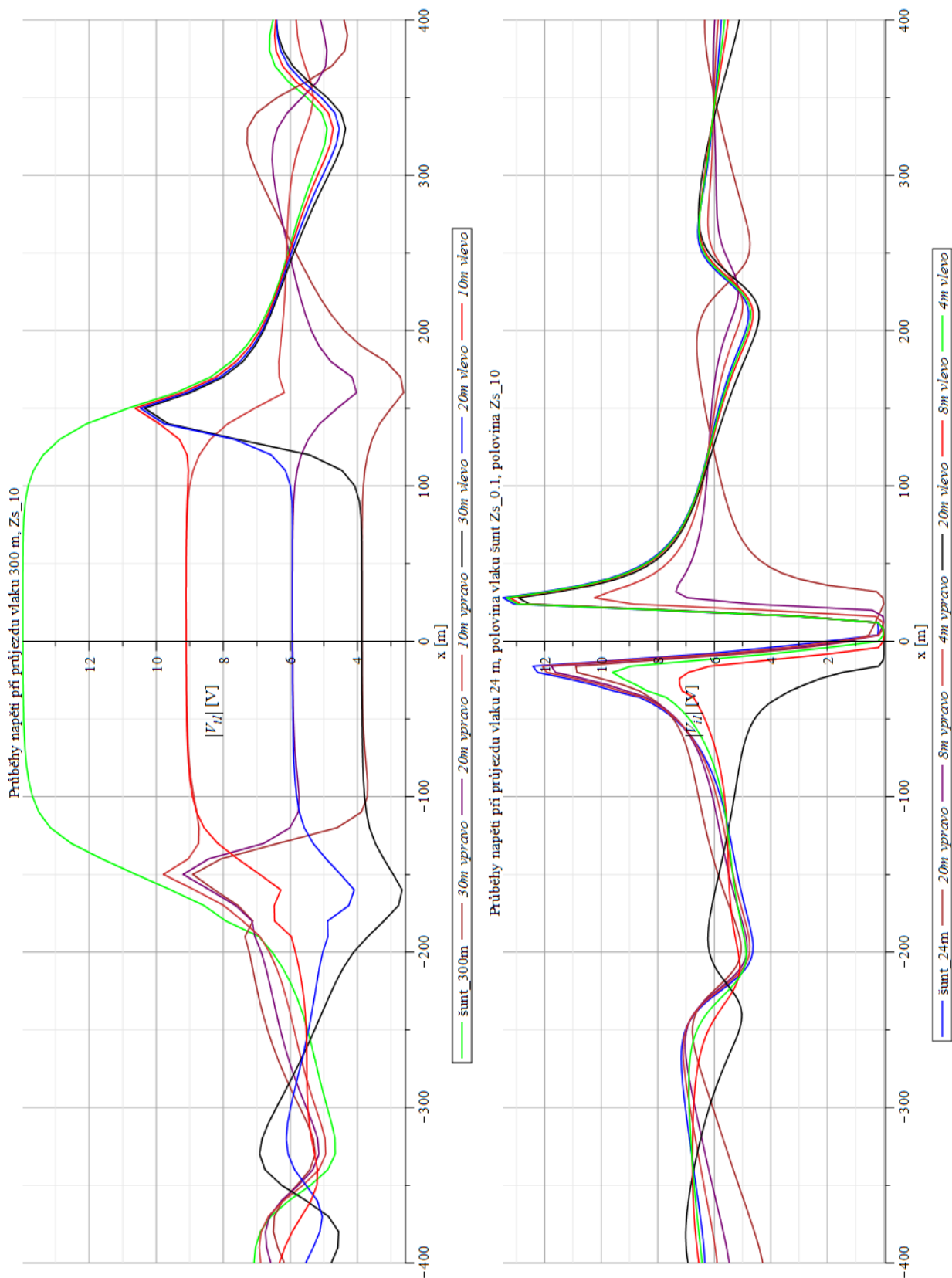
Obrázek 10.3-2: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 300 m, šuntová impedance odpovídá změřené hodnotě (vlevo), průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m, šuntová impedance odpovídá desetiné změřené hodnoty (vpravo)



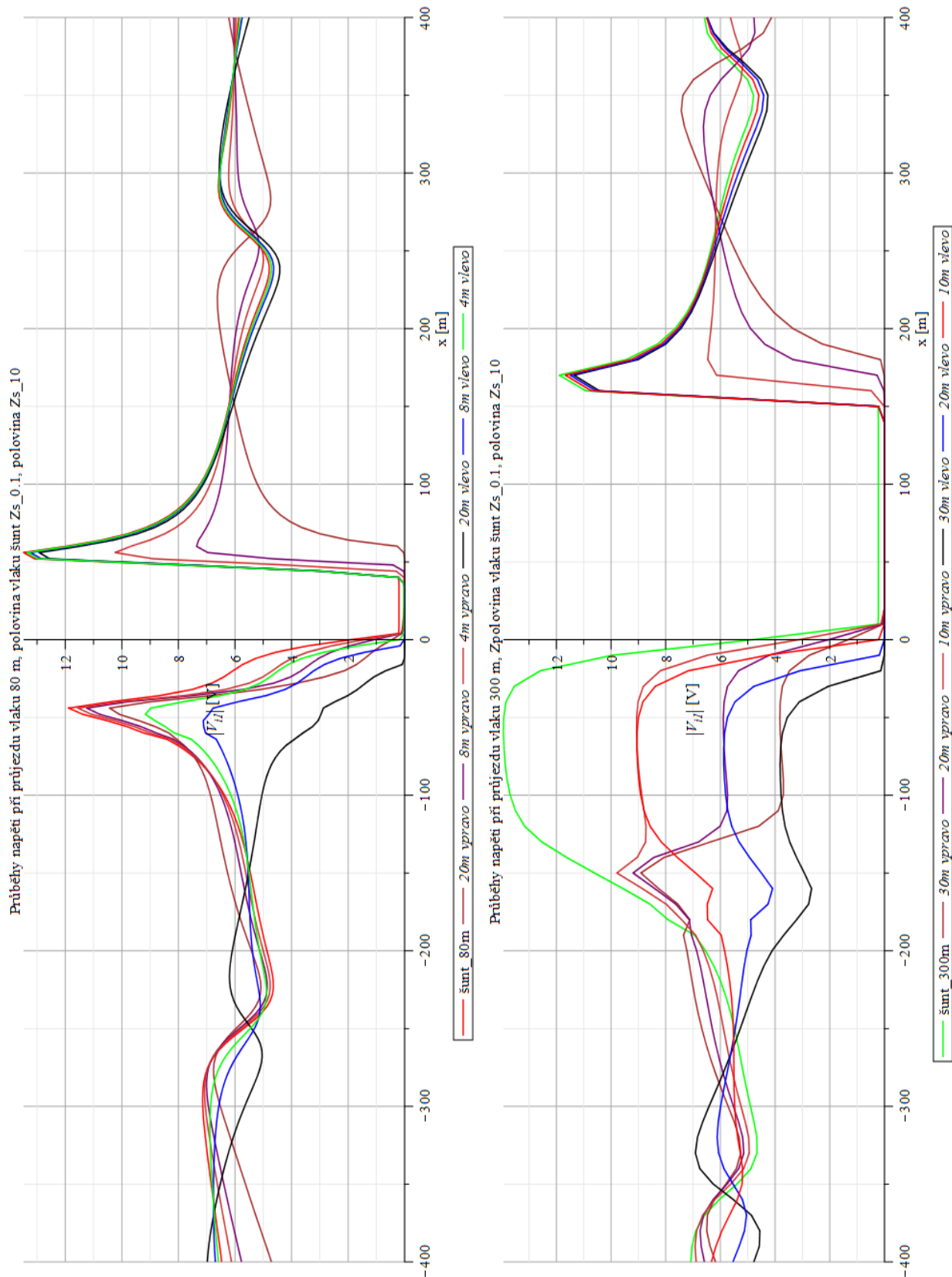
Obrázek 10.3-3: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 80 m (vlevo) a 300 m (vpravo), šuntová impedance odpovídá desetina měřené hodnoty.



Obrázek 10.3-4: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m (vlevo) a 80 m (vpravo), šuntová impedance odpovídá desetinásobku změřené hodnoty.



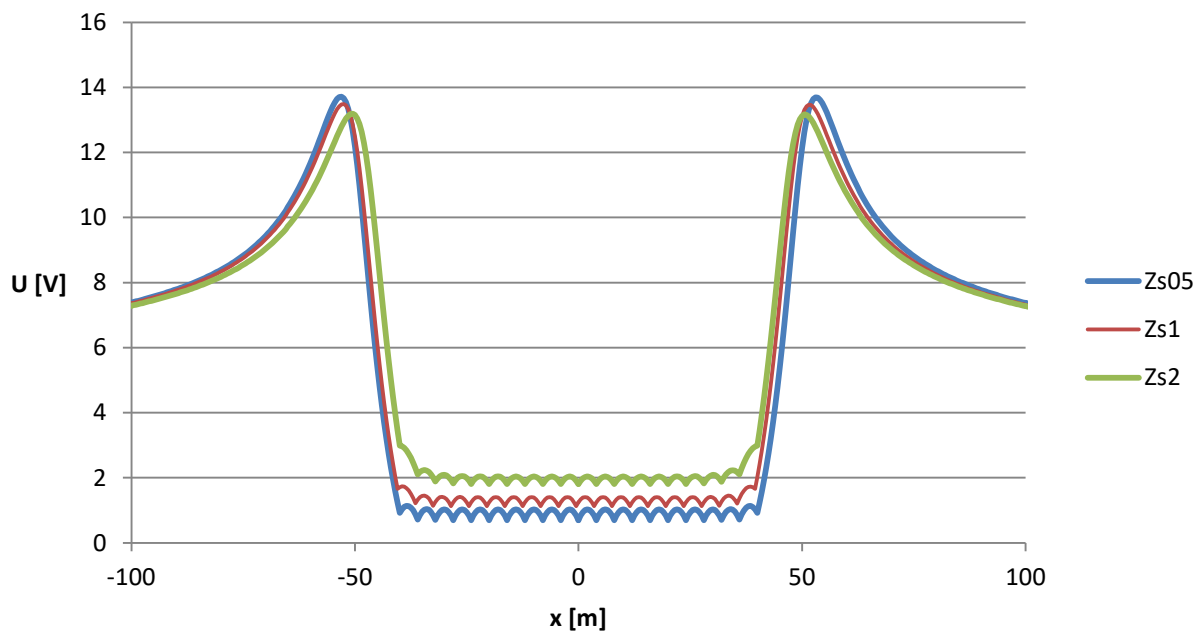
Obrázek 10.3-5: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 300 m, šuntová impedance odpovídá desetinasobku změřené hodnoty (vlevo). Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 24 m, šuntová impedance v levé polovině vlaku odpovídá desetinasobku změřené hodnoty, a v pravé polovině desetinu změřené hodnoty (vpravo).



Obrázek 10.3-6: Průběhy napětí při průjezdu vlaku délky 80 m (vlevo) a 300 m (vpravo), šuntová impedance v levé polovině vlaku odpovídá desetinásobku změřené hodnoty, a v pravé polovině desetině změřené hodnoty.

10.4 Výsledky analýzy přejezdu vlaku kolem IB na 50 kHz, s jemným krokem analýzy, pro různé vlaky a různé impedance šuntu

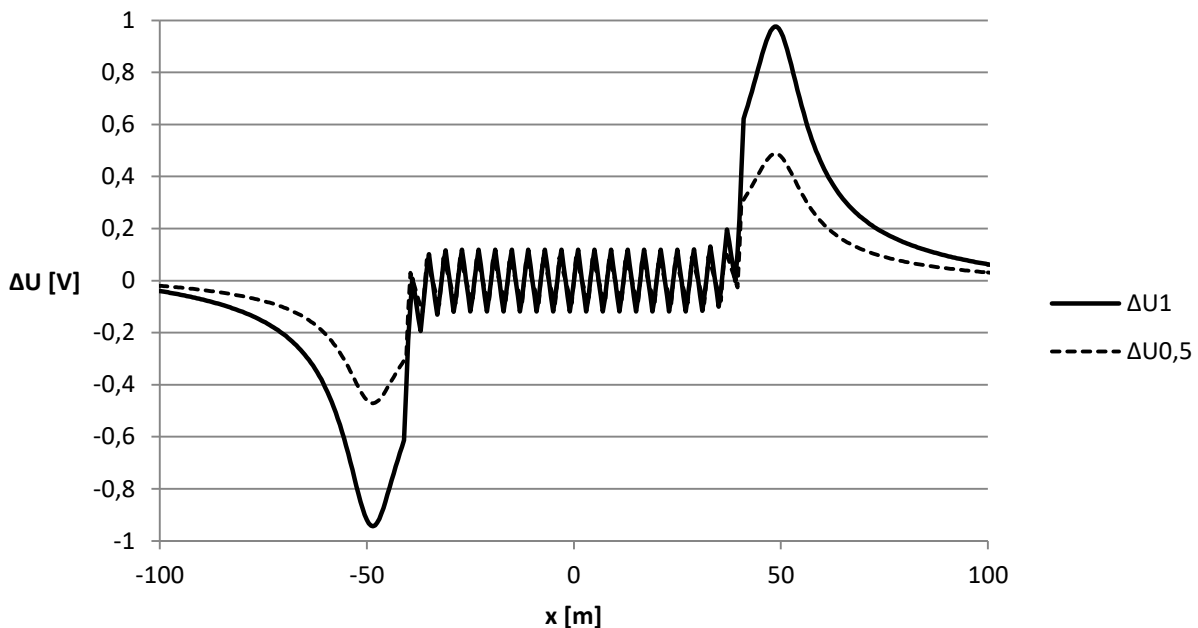
Vlak 80m, U_{ib}



Obrázek 10.4-1: Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 80 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m

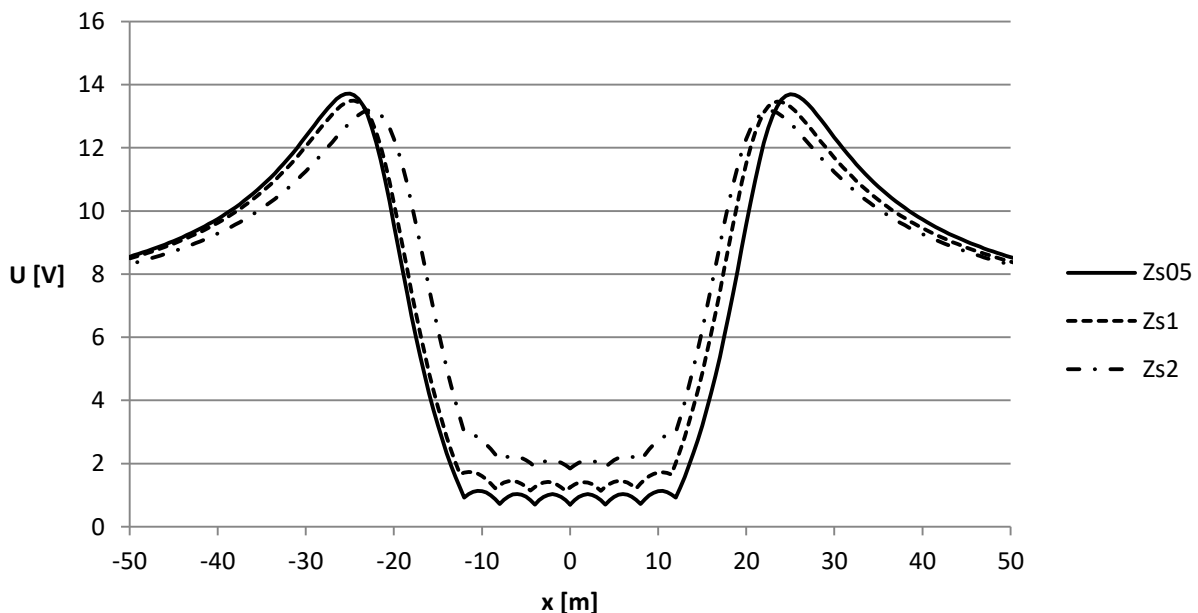


Vlak 80m, Zs1, rozdíly napětí



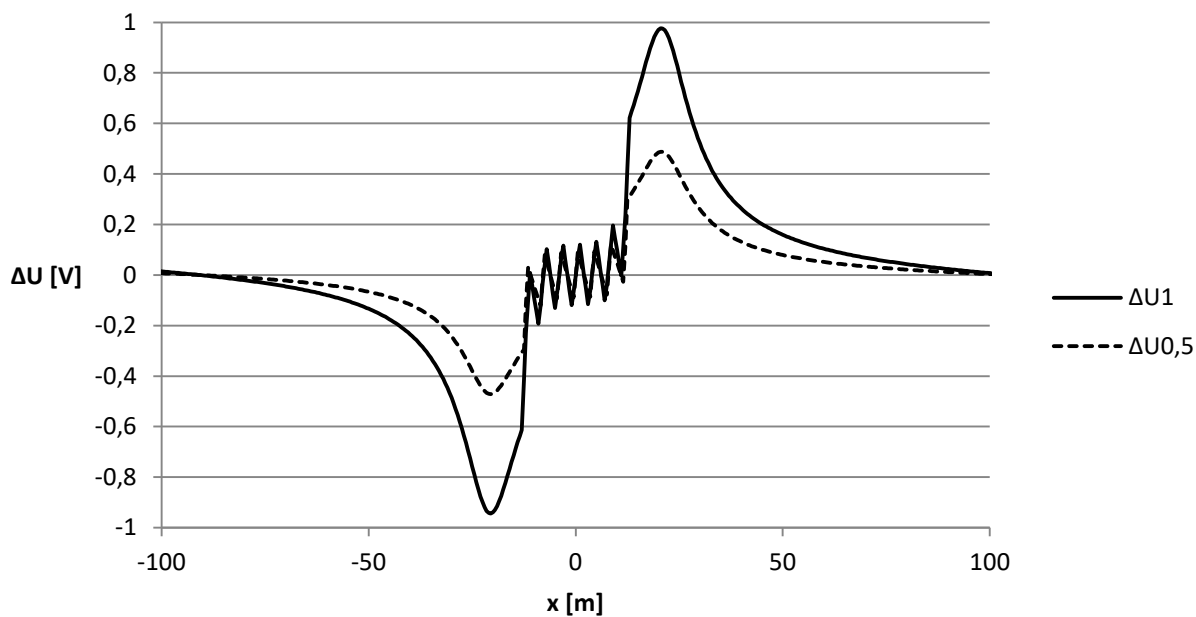
Obrázek 10.4-2: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 80 m, se vzdáleností mezi šuntů 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m

Vlak 24m, Uib



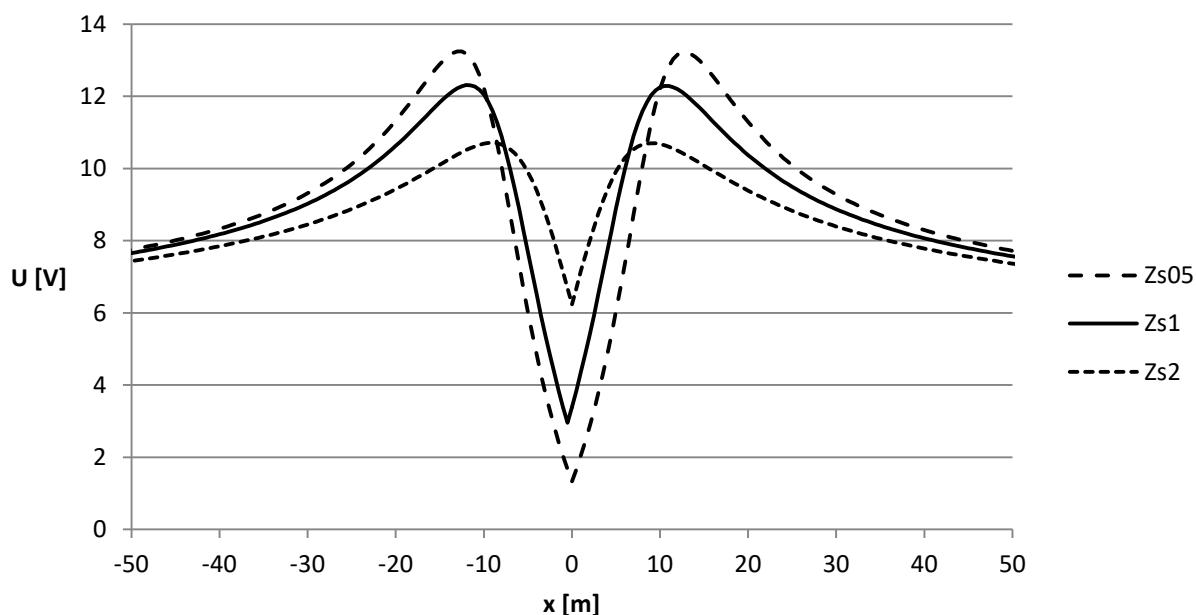
Obrázek 10.4-3: Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 24 m, se vzdáleností mezi šuntů 4 m, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m

Vlak 24m, Zs1, rozdíly napětí



Obrázek 10.4-4: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 24 m, se vzdáleností mezi šuntů 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.

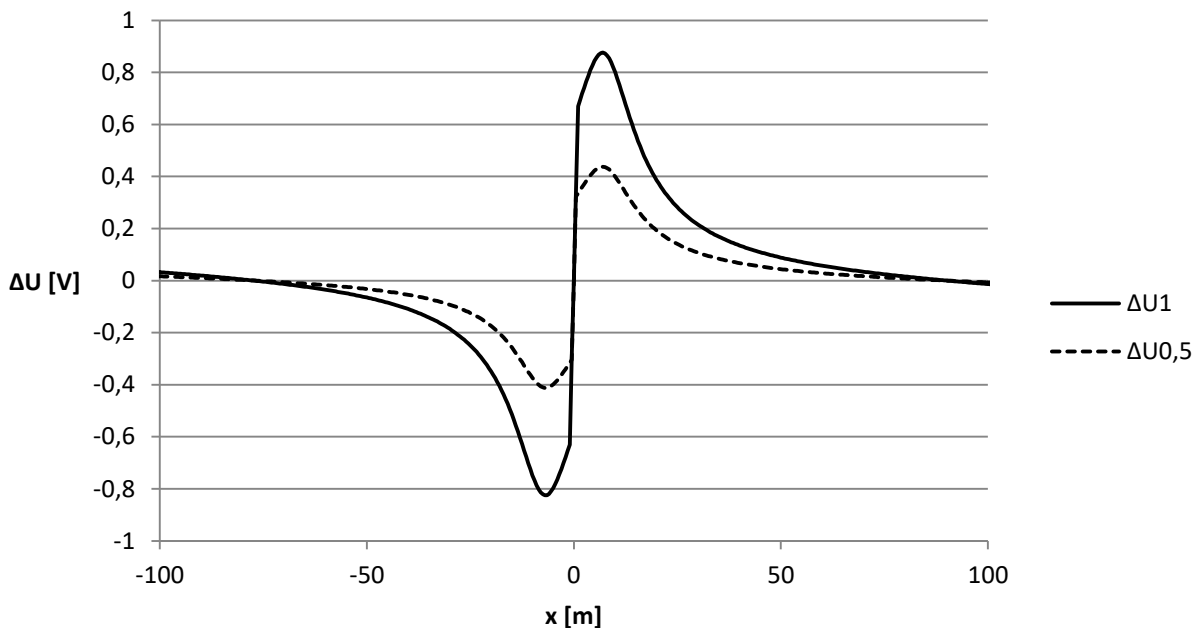
Vlak 0m, Uib



Obrázek 10.4-5 Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro osamocený šunt, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m

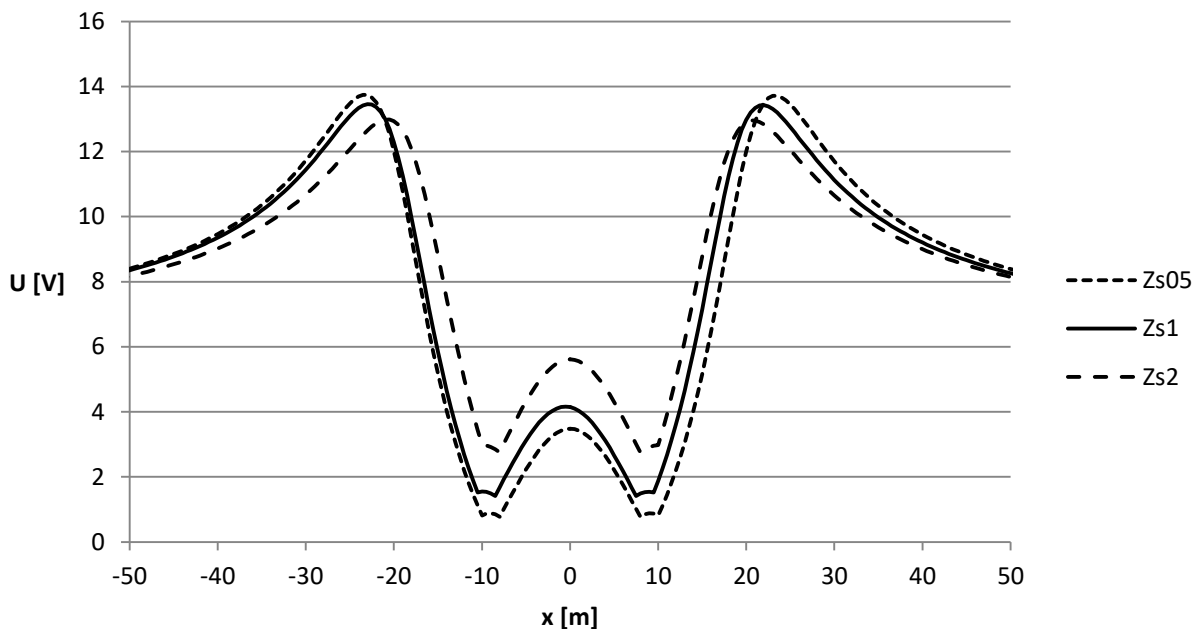


Vlak 0m, Zs1, rozdíly napětí



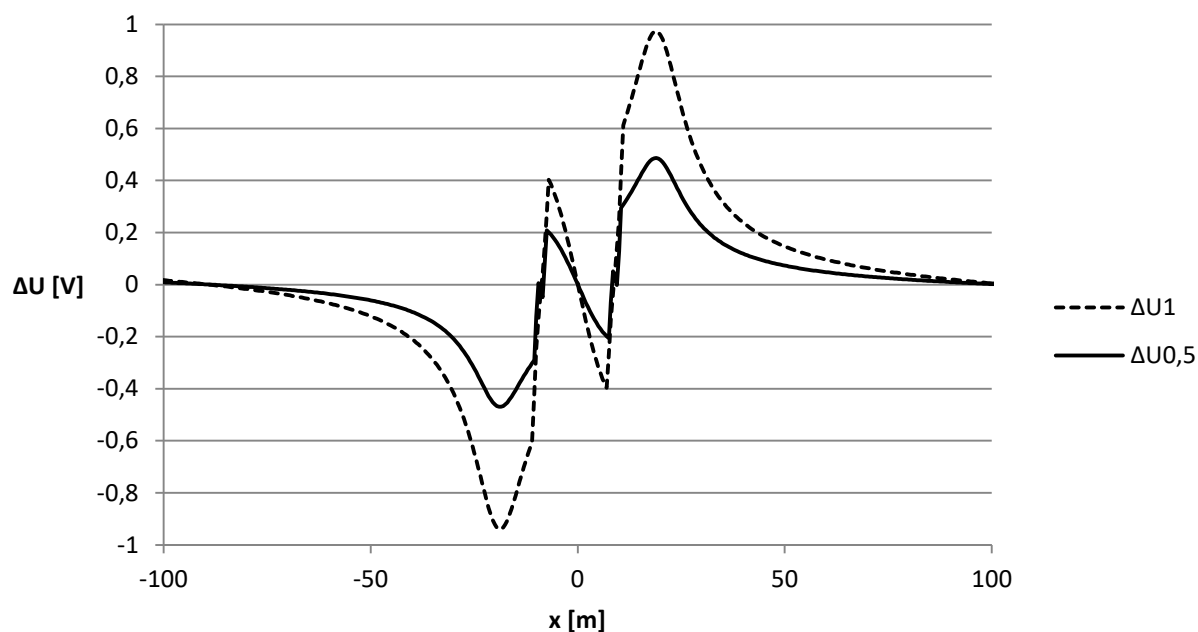
Obrázek 10.4-6: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro osamocený šunt, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.

Vlak 20m, Uib



Obrázek 10.4-7: Průběhy napětí v IB při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 20 m, se vzdáleností mezi šunty 2, 16 a 2 m, pro šuntovou impedanci 0,5, 1 a 2 Ohm, krok analýzy 0,5 m

Vlak 20m, Zs1, rozdíly napětí



Obrázek 10.4-8: Průběhy rozdílů napětí na pravé a levé straně IB pro snímače vzdálené 1 m a 0,5 m od IB, při průjezdu vlaku na 50 kHz pro vlak dlouhý 24 m, se vzdáleností mezi šunty 4 m, pro šuntovou impedanci 1 Ohm, krok analýzy 0,5 m.