

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Analýza ovlivňování blízkých produktvodů
elektrickými venkovními vedeními a kabely**

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektroenergetika

Ing. Zbyněk Janda

**Analýza ovlivňování blízkých produktovodů
elektrickými venkovními vedeními a kabely**

Školitel: doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Datum vykonání státní doktorské zkoušky: 11.06.2015

Datum odevzdání práce: 31.03.2017

V Plzni, 2017

Abstrakt

Předkládaná disertační práce je zaměřena na analýzu nežádoucích účinků venkovních vedení a kabelů na ocelová izolovaná potrubí. Práce se podrobně zabývá rozložením elektromagnetického pole v okolí ovlivněných potrubí s respektováním blízkých omezujících vodičů a způsobem zakomponování jejich účinků do numerického výpočtu indukovaných napětí v potrubí. Další část řeší způsob výpočtu a vyhodnocení indukovaných napětí v potrubí při provozním stavu vedení a s tím souvisejícího vlivu na korozi potrubí střídavými proudy. Zjištěné výsledky byly ověřeny praktickým měřením. Předmětná práce dále řeší analýzu vlivu venkovních vedení na kvalitu svařování potrubí. Pro problematiku nebezpečných vlivů kabelových vedení vvn a zvn na blízké potrubní systémy jsou zpracovány a vyhodnoceny výpočty indukovaných napětí pro různé varianty souběhů. Elektromagnetická pole jsou řešena s využitím výpočetního nástroje COMSOL Multiphysics 4.3.

Klíčová slova

Induktivní vliv, korozní vliv, redukční koeficient, omezující vodič, potrubí, potenciál potrubí, měření, vedení vvn a zvn, kabely vvn a zvn, poruchový stav vedení, provozní stav vedení, softwarová simulace.

Abstract

The thesis is focused on the analysis of negative effects of overhead lines and cables on insulated steel pipes. The thesis elaborates on the distribution of the electromagnetic field in the surroundings of the affected pipelines with respect to the nearby mitigation wires and the incorporation of their effects into the numerical calculation of the induced voltage in the pipeline. In the next part of the thesis the method of calculating and evaluating the induced voltage in the pipeline during the operating state of the line is dealt with, and the related influence on the corrosion of the pipeline by alternating currents is investigated. The results were verified by practical measurements. The thesis further deals with the analysis of the influence of overhead lines on the quality of pipe welding. For the problems of the hazards of VHV overhead lines on nearby pipeline systems, calculations of induced voltages for different variants of concurrent are processed and evaluated. Electromagnetic fields are solved using the COMSOL Multiphysics 4.3 computing tool.

Key words

Inductive influence, corrosive influence, reduction coefficient, mitigation wire, pipeline, pipeline potential, measurement, overhead line VHV, cables VHV, fault condition of overhead line, operation condition of overhead line, software simulation.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této disertační práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software při řešení této disertační práce byl používán legálním způsobem.

.....
podpis

V Plzni dne 31.3.2017

Zbyněk Janda

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval svému školiteli panu doc. Ing. Karlovi Noháčovi, Ph.D. za podporu během celého studia, cenné odborné rady, umožnění vlastního rozvoje v oblasti elektroenergetiky a profesionální vedení při přípravě závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavovi Hromádkovi, Ph.D. za spolupráci při měření v terénu a panu Ing. Pavlovi Veletovi, specialistovi v oblasti protikorozní katodické ochrany, za přínosné odborné konzultace.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 7 |
| ÚVOD | 9 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 11 |
| ZÁKLADNÍ POJMY | 14 |
| 1 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY | 16 |
| 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE | 20 |
| 2.1 VLIV SOUBĚŽNÝCH POTRUBÍ..... | 20 |
| 2.2 OPTIMALIZACE OCHRANNÝCH OPATŘENÍ | 21 |
| 2.3 VLIV NA KOROZI POTRUBÍ | 22 |
| 2.4 SVAŘOVÁNÍ POTRUBÍ V BLÍZKOSTI VENKOVNÍCH VEDENÍ..... | 22 |
| 2.5 NEŽÁDOUCÍ VLIVY KABELOVÝCH VEDENÍ NA POTRUBNÍ SYSTÉMY | 23 |
| 3 ANALÝZA VZÁJEMNÉHO OVLIVŇOVÁNÍ SOUBĚŽNÝCH POTRUBÍ | 24 |
| 3.1 ZÁKLADNÍ PŘEDPOKLADY PRO ANALÝZU MAGNETICKÉHO POLE..... | 24 |
| 3.2 ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE V OKOLÍ SOUBĚŽNÝCH POTRUBÍ | 26 |
| 4 ANALÝZA VLIVU POZICE OMEZUJÍCÍHO VODIČE NA REDUKČNÍ KOEFICIENT | 32 |
| 4.1 ZÁKLADNÍ PŘEDPOKLADY PRO ANALÝZU MAGNETICKÉHO POLE..... | 32 |
| 4.2 VÝSLEDKY OMEZUJÍCÍCH ÚČINKŮ ZEMNÍHO PÁSKU V ZÁVISLOSTI NA JEHO POZICI | 35 |
| 4.2.1 Zemnicí pásek v ose 90° | 35 |
| 4.2.2 Zemnicí pásek v ose 45° | 38 |
| 4.2.3 Zemnicí pásek v ose 0° | 40 |
| 4.2.4 Souhrn výsledků optimálního uložení zemnicího pásku | 41 |
| 5 VLIV PROVOZNÍHO STAVU VENKOVNÍCH VEDENÍ NA POTRUBÍ | 44 |
| 5.1 NAVRŽENÝ POSTUP VÝPOČTU PRO PRAKTICKÉ ÚČELY | 44 |
| 5.2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ VLIVU VEDENÍ | 50 |
| 5.3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ | 57 |
| 5.4 SOUHRN VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ DÍLČÍCH METOD | 59 |
| 6 VLIV PROVOZNÍHO STAVU VENKOVNÍCH VEDENÍ NA MONTÁŽ POTRUBÍ | 61 |
| 6.1 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ | 62 |
| 6.2 SOUHRN VÝSLEDKŮ A ZHODNOCENÍ VLIVU NA KVALITU SVARŮ POTRUBÍ | 68 |
| 7 ANALÝZA VLIVU KABELŮ NA BLÍZKÁ POTRUBÍ | 69 |
| 7.1 ZÁKLADNÍ PŘEDPOKLADY PRO ANALÝZU MAGNETICKÉHO POLE..... | 69 |
| 7.2 ANALÝZA VLIVU KABELOVÉHO VEDENÍ NA POTRUBÍ BEZ OCHRANNÝCH OPATŘENÍ | 72 |
| 7.3 INDUKOVANÁ NAPĚTÍ V POTRUBÍ OD KABELOVÉHO VEDENÍ | 77 |
| 7.4 ANALÝZA OPTIMÁLNÍCH OCHRANNÝCH OPATŘENÍ | 81 |
| 8 ZÁVĚR | 87 |
| 8.1 VLASTNÍ PŘÍNOS | 88 |
| 8.2 NÁVRH NA DALŠÍ NÁVAZNÉ ROZVINITÍ ZPRACOVÁVANÉHO TÉMATU | 89 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 90 |
| SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ | 94 |

PŘÍLOHY..... 1

Úvod

Již od samotného vzniku lidstva lidé vyžadují pro své žití stále větší komfort, který je v současné době spojen s dodávkou různých forem energií, produktů a poskytováním služeb. Takové typy uspokojení si vynucují odlišná technická řešení, která se mohou mnohdy navzájem limitovat. Jednou z těchto komodit a současně tou aktuálně nejdůležitější je elektrická energie.

Elektrická energie je přepravována z místa výroby do místa spotřeby přes venkovní či kabelová vedení a její vliv na okolí je spjat s elektrickým a magnetickým polem. Souvislosti mezi elektřinou a magnetismem byly objasněny již v první polovině 19. století. Hans Christian Oersted dokázal svým experimentem, že elektrický proud je vždy doprovázen magnetismem již roku 1820. O 11 let později byl M. Faradayem prokázán jev opačný, tj. že magnetismus může indukovat napětí, které může mít za následek vytvoření elektrického proudu. [32] Tento objev je v mnoha technických směrech využíván s výhodou, ale v některých ohledech se jeví jako nežádoucí.

Nežádoucí vlivy se projevují při poruchovém i provozním stavu elektrizační soustavy, přičemž charakter nežádoucích účinků je různý. Poruchový stav v elektrizační soustavě může vyvolat v blízkých úložných zařízeních krátkodobě nebezpečně vysoké hodnoty indukovaných napětí, zatímco provozní stav elektrických vedení a kabelů je příčinou trvale se vyskytujících indukovaných napětí v blízkých ocelových izolovaných potrubích. Tato dlouhodobá střídavá indukovaná napětí mohou v místě lokální poruchy izolace potrubí způsobit nežádoucí korozi střídavými proudy.

V této práci jsem se zaměřil na negativní vlivy přenášené elektrické energie, působící na okolní ocelové izolované potrubní systémy. Analyzoval jsem nebezpečné vlivy elektrických venkovních vedení a kabelů na ocelové potrubní systémy a vlivy na korozi potrubí střídavými proudy, vyvolané provozem elektrizační soustavy. Za účelem konvergovat výsledky ke skutečným hodnotám, jsem do výpočtů zakomponoval existenci souběžných inženýrských sítí, která svou přítomností deformují elektromagnetické pole. Pro efektivní eliminaci nežádoucích účinků elektrizační soustavy na úložná zařízení jsem

stanovil vhodná ochranná opatření, která vychází ze zpřesnění výpočtů elektromagnetického pole.

Prostřednictvím této práce poskytují podrobný náhled a potřebnou metodiku na řešení netriviálních případů souběhů ovlivňujících vedení a ovlivněných potrubí, která si provozovatelé potrubních systémů a elektrických vedení, s ohledem na dnes stále rozšiřovanou technickou infrastrukturu, vynucují.

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|-------------------------------------|--|
| vvn..... | Velmi vysoké napětí |
| zvn..... | Zvlášť vysoké napětí |
| \bar{J} (A/m ²) | Hustota elektrického proudu |
| S (m ²) | Průřez vodiče |
| γ (S/m)..... | Elektrická konduktivita (měrná elektrická vodivost), kap. 3, 7.1 |
| μ_r (H/m)..... | Relativní permeabilita |
| ε_r (F/m)..... | Relativní permitivita |
| \bar{B} (T) | Magnetická indukce |
| \bar{I}_p (A) | Elektrický proud potrubím |
| a_0 (m) | Vzdálenost mezi analyzovanými vodiči |
| r (-) | Redukční koeficient |
| \bar{H} (A/m) | Intenzita magnetického pole |
| Ψ (C)..... | Elektrický indukční tok |
| t (s) | Čas |
| \bar{D} (C/m ²) | Elektrická indukce |
| Q (C)..... | Elektrický náboj |
| Φ (Wb)..... | Magnetický indukční tok |
| \bar{E} (V/m) | Intenzita elektrického pole |
| u_i (V) | Indukované napětí, kapitola 3 |
| R (Ω)..... | Elektrický odpor |
| A, B, C..... | Fázové vodiče |
| ZL..... | Zemnicí lano |
| ZP..... | Omezující vodič (zemnicí pásek) |
| r_p (m) | Poloměr potrubí |
| r_A (m)..... | Poloměr vodiče |

| | |
|---|---|
| $\overline{I_{zP}}$ (A) | Elektrický proud omezujícím vodičem (zemnicím páskem) |
| $\overline{J_{zP}}$ (A/m ²) | Proudová hustota omezujícím vodičem (zemnicím páskem) |
| $\overline{I_{zL}}$ (A) | Elektrický proud zemnicím lanem |
| U_i (V)..... | Ideální podélné napětí, kapitola 5 |
| f (Hz)..... | Frekvence sítě |
| M (μH/km)..... | Součinitel vzájemné indukčnosti |
| $\overline{I_v}$ (A) | Provozní elektrický proud fází |
| l (km) | Délka výpočetního úseku souběhu |
| U_{iv} (V) | Výsledné ideální podélné napětí |
| N (-)..... | Počet výpočetních úseků |
| U_i' (V/km)..... | Ideální podélné napětí vztahované na jednotku délky |
| U_p (V) | Potenciál potrubí |
| $\overline{\gamma}$ (1/km) | Součinitel šíření, kapitola 5, 7.3 |
| β (Np/km)..... | Konstanta tlumení |
| α (rad/km)..... | Konstanta fáze |
| X_L (Ω/km)..... | Měrná induktivní reaktance potrubí |
| B_C (S/km)..... | Měrná kapacitní susceptance izolovaného potrubí |
| R (Ω/km)..... | Měrná rezistance potrubí |
| G (S/km)..... | Měrná konduktance izolovaného potrubí |
| x (-)..... | Parametr pro určení součinitele vzájemné indukčnosti |
| ρ_z (Ω·m)..... | Zdánlivá rezistivita půdy |
| r_c (-) | Celkový redukční koeficient |
| U_{pv} (V) | Výsledný potenciál potrubí |
| D (m) | Průměr potrubí |
| δ (m) | Tloušťka izolace potrubí |
| G_p (μS/m ²)..... | Průměrná elektrická vodivost izolace potrubí |
| ρ_{Fe} (Ω·m)..... | Měrná rezistance oceli |
| μ_0 (H/m)..... | Permeabilita vakua |

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| ω (1/s)..... | Kruhová frekvence |
| ϵ_0 (F/m)..... | Permitivita vakua |
| ϵ_r (-)..... | Relativní permitivita izolace potrubí |

Základní pojmy

Vliv: vznik nežádoucího napětí nebo proudu v ocelovém izolovaném potrubí působením venkovního trojfázového vedení. Podle druhu vazby mezi vedením a ocelovým potrubím se dělí na kapacitní, induktivní a galvanický vliv a podle doby působení na trvalý, dlouhodobý a krátkodobý vliv. [37]

Nebezpečný vliv: vliv, při němž vznikají na potrubí napětí a proudy nebezpečné pro pracující na potrubí nebo na jeho zařízení, popř. proudy a napětí, které mohou ohrozit funkci zařízení. [37]

Induktivní vliv: vliv střídavého magnetického pole silového vedení na potrubí. [37]

Kapacitní vliv: vliv střídavého elektrického pole silového vedení na potrubí. [37]

Galvanický vliv: vliv zkratového proudu tekoucího zemí na potrubí. [37]

Souběh: sblížení ocelového izolovaného potrubí uloženého v zemi a venkovního trojfázového vedení vvn nebo zvn uvnitř oblasti vlivu. [37]

Výpočetní úsek: úsek obecného souběhu, pro který se samostatně vyšetřuje nebezpečný vliv. [37]

Délka souběhu: délka kolmého průmětu potrubí na osu vedení vvn nebo zvn. [37]

Podélné napětí: napětí indukované střídavým elektromagnetickým polem vedení vvn nebo zvn v obvodu tvořeném potrubím a zemí. [37]

Výsledný redukční činitel: poměr výsledného napětí indukovaného v ocelovém potrubí při uplatnění kompenzačních účinků sousedních uzemněných vodičů a kovových konstrukcí k napětí, které by se indukovalo v ocelovém potrubí bez kompenzačního účinku těchto vodičů a konstrukcí. [37]

Kompenzační vodič: vodič umístěný v blízkosti trojfázového vedení nebo potrubí

splňující předpoklady redukčního účinku (např. zemnicí lana, kovové obaly kabelů, nadložné vodiče, koleje, potrubí atd.). [37]

1 Analýza současného stavu problematiky

Historie problematiky indukovaných napětí v potrubích sahá až do první poloviny minulého století. Na toto téma bylo vydáno nemalé množství odborných článků a publikací. Cílem mnoha studií bylo matematicky popsat fyzikální jevy při souběhu venkovních vedení a v zemi uložených kovových potrubí. Moderní věda však k dané problematice často přistupuje s využitím výpočetních programů, které řeší konkrétní dispoziční uspořádání za jednoznačných fyzikálních podmínek. Pro správné pochopení dějů se nabízelo vypracování analytického výpočtu indukovaných napětí v potrubí pro zjednodušený model. Takový postup je publikován v [1]. Pro model souběžného vedení a potrubí byla sestavena soustava rovnic, která byla řešena s použitím matice. Takový model byl též řešen za předpokladu rozdělení potrubí na dvě a tři kaskády, které umožňují uvažovat na délce potrubí různé parametry prostředí. Při běžných výpočtech indukovaných napětí a proudů v potrubí se uvažuje homogenní prostředí a tedy rezistivita půdy podél celé trasy konstantní. Ve skutečnosti se však tento parametr může značně měnit. Publikovaným postupem lze změny prostředí elegantně respektovat.

Analytického výpočtu indukovaných napětí a proudů v potrubí dle [1] bylo využito v problematice koroze potrubí střídavými proudy v [2], kde byl zkoumán vliv třech souběžných vedení zvn na blízký plynovod uložený v zemi. Trasa byla rozdělena do čtyř oblastí s různými hodnotami rezistivity půdy. Byly zjišťovány hodnoty indukovaných napětí a proudů v potrubí při provozním a poruchovém stavu vedení a rychlost koroze potrubí střídavými proudy. Vypočítané výsledky byly ověřeny následným měřením.

V roce 2006 byl prezentován vyvinutý softwarový nástroj, který pro souběh venkovního vedení a potrubí, určí indukovaný proud a napětí v potrubí za předpokladu provozního stavu vedení. Pro výpočet je využívána metoda konečných prvků. Vyvinutý program počítá pouze za předpokladu, že trasy vedení a potrubí jsou rovnoběžné, rezistivita půdy a odporu izolace potrubí jsou v celé délce souběhu konstantní. Byly zjištěny výsledné průběhy indukovaných napětí a proudů pro případy, kdy je:

- a) jeden konec potrubí uzemněn, druhý veden kolmo od venkovního vedení

b) oba konce potrubí vedeny kolmo od venkovního vedení

c) jeden konec potrubí ukončen bez uzemnění, druhý veden kolmo od venkovního vedení.

O tomto softwaru a provedených simulacích je pojednáno ve [4]. Potrubní systémy procházejí často rekonstrukcí, spočívající ve výměně podstatné části potrubí. Vznikají tak místa, kde se stávající a nová potrubí propojují. Odlišné elektrické parametry stávajících a nových potrubí, budou mít vliv na průběh indukovaných napětí a proudů v celé délce potrubí. Popsanou skutečností se publikace [4] nezabývala.

Změnami parametrů systému se zabývá [11], kde se uplatňují konstantní hodnoty dílčích parametrů v celém systému. Neuvažuje se, podobně jako ve [4], rozhraní odlišných hodnot parametrů.

Mezi nadzemním vedením a v zemi uloženým potrubím mohou vznikat vazby induktivní a galvanické. V publikaci [8] řeší autoři modelování dané problematiky metodami s rozprostřenými a soustředěnými parametry. Výpočty respektují fázové vodiče, zemní lano, uzemnění stožárů a v zemi uložené potrubí.

Důležitým faktorem při výpočtu indukovaných napětí v potrubí je redukční činitel zemního lana venkovního vedení. Podrobný výpočet tohoto činitele je uveden v [6], kde autor vycházel z normativního předpisu [40]. Redukční činitel je závislý na rezistivitě půdy, kterou je možno změřit třemi metodami:

a) Wennerova metoda (metoda čtyř elektrod)

b) Schlumbergerova metoda (metoda čtyř elektrod)

c) Měření tyčí (metoda tří elektrod).

Autor použil Wennerovu metodu, která nachází své uplatnění zejména v oblasti katodické ochrany potrubí, např. pro analýzy bludných proudů. Rezistivitu půdy s využitím této metody je možno zjistit maximálně do hloubky 3 m.

Článek [6] dále popisuje následky galvanického přerušeni zemního lana na souběžné potrubí, za předpokladu, že zemním lanem protéká poruchový proud. Výpočet je doplněn stanovením redukčních činitelů zemního lana v jednotlivých částech souběhu. Výpočty redukčních koeficientů zemních lan se zabývá také [35].

Normy [36 - 39] zjednodušují výpočet indukovaných napětí do potrubí zanedbáním průhybů zavěšených vodičů na konstrukcích stožárů a předpokládají situování potrubí a vodičů v jedné výškové úrovni, vyjma míst křížení. V roce 2013 byl analyzován model souběhu venkovního vedení a potrubí s uvažováním průhybů nadzemních vodičů. Jako křivka zavěšených vodičů byla uvažována řetězovka. Analýza indukovaných vlivů byla provedena numericky rozdělením řetězovky na výpočetní úseky. Tato problematika je popsána v [7].

Příčinou vzniku indukovaných napětí v potrubí může být úder blesku do souběžného elektrického vedení vvn či zvn. Vysoké hodnoty indukovaných napětí mohou způsobit porušení izolace potrubí. Ochranným opatřením před těmito induktivními účinky je položení podélného zemniče do země paralelně s potrubím. Zemnič se propojuje s potrubím přes stejnosměrné oddělovací členy. Tyto nebezpečné účinky úderu blesku do vedení vvn a zvn se uplatňují při křížení potrubí a vedení nebo při jejich těsných souběžích. Tato problematika byla analyzována v [3] způsobem, že nejprve byl simulován úder blesku do stožáru pomocí výpočetního programu a následně s využitím Fourierovy transformace byly dopočítány hodnoty podélného napětí v potrubí.

Analýzy nebezpečných vlivů venkovních vedení na blízká kovová potrubí se dnes řeší výpočetními programy. Vyvinutými programy pro tyto účely jsou např. CDEGS a InterfStud, které byly v roce 2012 vyzkoušeny na reálném souběhu nového plynovodu Stream a stávající linky 400 kV. [9]

Potrubí jsou běžně ukládána do země, která vzhledem k jejímu složení bývá často pro ocelová potrubí korozně agresivním prostředím. Primární, neboli pasivní, protikorozi ochranou takových potrubí je izolace, která mechanicky odděluje povrch kovu od okolního korozního prostředí. Sekundární, neboli aktivní, katodická ochrana využívá pro svou funkci řízený stejnosměrný zdroj. Vzniklý elektrický obvod protékající stejnosměrným proudem sestává ze stejnosměrného zdroje, chráněného potrubí, obětní anody, spojovacích

vodičů a půdy. Velikostí protékajícího stejnosměrného proudu se řídí velikost potenciálu potrubí, který má majoritní vliv na rychlost koroze potrubí.

Problematika výpočtů nežádoucích vlivů venkovních vedení úzce souvisí s aktivní protikorozi ochranou potrubních systémů, která je běžně využívána u ocelových izolovaných plynovodů, vodovodů, ropovodů, ethylenovodů, apod.

Dříve se používala izolace potrubí asfaltová, dnes polyetylenová, jejíž elektrická vodivost je oproti asfaltové značně nižší. Z hlediska aktivní katodické ochrany potrubí je nízká elektrická vodivost izolace potrubí kladnou vlastností, z pohledu induktivních vlivů elektrických vedení vvn a zvn však nikoliv. Následky výzkumu nových izolačních materiálů vyžadují zvýšený zájem o zajištění vyhovující velikosti indukovaných napětí v takto protikorozně chráněných potrubích, a to z hlediska bezpečnosti i provozu. Hodnoty indukovaných napětí mezi potrubím a zemí se u blízkých souběhů pohybují v řádech jednotek až desítek voltů. Narůstající hodnota indukovaného napětí v potrubích má za následek poruchu řízení aktivní katodické ochrany s vloženým proudem a případnou korozi potrubí střídavými proudy. Je tedy nezbytné predikovat hodnoty indukovaných napětí ve fázi před realizací elektrických vedení nebo potrubí.

Na téma protikorozi ochrany bylo vydáno podstatné množství článků. V oblasti mého zkoumání jsou užitečnými publikacemi články [10, 12], které pojednávají o podstatě katodické ochrany, o numerických výpočtech parametrů a měřících systémech.

V současné době neexistuje norma, která by řešila postup výpočtů nebezpečných vlivů kabelových vedení vvn a zvn na blízká úložná zařízení. Jelikož jsou připravovány stavby kabelových vedení vvn, je ze strany investorů vyvíjen nátlak na tuto oblast.

2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je analyzovat nebezpečné vlivy venkovních vedení na okolní inženýrské sítě s cílem konvergovat výsledky k reálným hodnotám. V disertační práci řeším danou problematiku z různých hledisek. Z hlediska zpřesňování výpočtů, respektuji a vyhodnocuji vliv okolních inženýrských sítí na výsledné indukované napětí v potrubí. Z hlediska ochranných opatření potrubí před induktivními vlivy, zkoumám a určuji optimální uložení zemnicího pásku ve vztahu k potrubí a venkovnímu vedení. Řeším tak problematiku zvýšení efektivity ochranných opatření a její zakomponování do normativního výpočtu. V oblasti omezování funkce katodické ochrany potrubí nežádoucími účinky elektrických vedení, zpracovávám praktické postupy pro výpočetní analýzu indukovaných napětí v potrubí. Výsledky navržených matematických postupů ověřuji praktickým měřením v terénu. Pro nově vznikající normu, zabývající se nebezpečnými vlivy kabelových vedení vvn a zvn na blízké potrubní systémy, analyzuji případy souběhů pro různé netriviální případy. Podrobným měřením zjišťuji, zda provozní stav venkovních elektrických vedení může být příčinou rušivých vlivů na proveditelnost svárů potrubí.

2.1 Vliv souběžných potrubí

Potrubí různých provozovatelů se v praxi často ukládají do společného koridoru. Ocelová v zemi uložená potrubí jsou vedena souběžně i několik kilometrů o vzájemné vzdálenosti respektující vlastní ochranná pásma. Při výpočtech induktivních vlivů vvn a zvn venkovních vedení na ocelová potrubí se v praxi souběžná potrubí běžně neuvažují. Ve skutečnosti však podstatně mění tvar magnetického pole a tím i výsledné indukované napětí do předmětného potrubí. Důvodem, proč se v praktických výpočtech neuvažují souběžná potrubí je, že do současné doby nebyly vytvořeny adekvátní výpočetní podklady. Podrobně analyzuji vliv souběžných potrubí na výsledné elektromagnetické pole a převádím danou skutečnost do formy pro praktické použití. Výpočet elektromagnetického pole řeším s využitím výpočetního nástroje COMSOL Multiphysics 4.3.

2.2 Optimalizace ochranných opatření

Cílem výpočtů nebezpečných induktivních vlivů dle platných norem je určit hodnotu potenciálu potrubí při jednofázové poruše na blízkém vedení vvn či zvn a rozhodnout, zda lze považovat dané dispoziční uspořádání systému s ohledem na elektrické parametry za bezpečné. V případě zjištění nevyhovujících hodnot potenciálu potrubí, je nezbytné navrhnout ochranná opatření, která budou mít za následek eliminaci nebezpečných účinků. Ochranná opatření lze realizovat na straně elektrických vedení a na straně ovlivněných potrubí. Vzhledem k technickým a ekonomickým možnostem je běžná realizace ochranných opatření prováděna na straně potrubí. Dlouhodobě osvědčeným ochranným opatřením je aplikace omezujícího vodiče, který se ukládá do země v souběhu s potrubím.

Omezující vodič je využíván ve funkci zemniče a stínění. Z hlediska aktivní katodické ochrany je nepřijatelné, aby jakákoliv kovová část katodicky chráněného potrubí byla galvanicky spojena s okolní zemí. Důvodem je zajištění řízení potřebné úrovně potenciálu potrubí, který je zpravidla nenulový. V určitých místech se proto omezující vodič propojuje s potrubím přes tzv. diodový oddělovací člen, kterým se s využitím prahových napětí sérioparalelně řazených diod nastaví úroveň napětí, při kterém se potrubí spojí s omezujícím vodičem, plnícím funkci zemniče.

Doposud řešené projektové dokumentace v sekci katodické ochrany, zabývající se těmito ochranami, opomíjely definici pozic omezujících vodičů vzhledem k chráněnému potrubí a ovlivňujícím vedením. Považuji tuto oblast za vědecky nedořešenou. Má iniciativa proto směřuje k analýze závislosti polohy omezujícího vodiče na míru omezení induktivních účinků elektrických vedení. Celý systém s navrženým ochranným opatřením analyzuji s využitím výpočetního nástroje COMSOL Multiphysics 4.3.

2.3 Vliv na korozi potrubí

Vývoj nových izolačních materiálů přináší novou problematiku, kterou je nutné v současné době neopomíjet. U souběhů potrubí opatřenými novými izolacemi o nízké elektrické vodivosti s linkami vvn a zvn vznikají v potrubích trvalá indukovaná napětí podstatných velikostí. Příčinou jejich vzniku jsou nesymetrie soustavy provozních proudů a geometrická nesymetrie vodičů elektrického vedení vzhledem k inkriminovanému potrubí. Negativním následkem indukovaného napětí v potrubí je omezení funkce aktivní katodické ochrany s vloženým proudem, kdy systém stanic katodických ochrany nelze automaticky řídit. V místech mechanické poruchy izolace současně může docházet ke korozi potrubí střídavými proudy.

Doposud se výpočet indukovaných napětí v potrubí při provozním stavu vedení neprováděl. Indukovaná napětí byla zjišťována měřením po realizaci stavby potrubí nebo elektrického vedení. Případná zjištění nežádoucích hodnot indukovaných napětí si vynucovala dodatečná ochranná opatření, jejichž realizace byla spojena s vyššími náklady a zvýšenou administrativou. Predikcí trvalých indukovaných napětí v potrubích ve fázi projektové přípravy stavby potrubí či elektrických vedení lze zmiňovaným komplikacím předejít.

Zabývám se proto vytvořením matematických postupů, které povedou ke stanovisku, zda bude nutné vliv elektrických vedení eliminovat či nikoliv. Správnost vytvořeného matematického postupu verifikuji praktickým měřením v terénu.

2.4 Svařování potrubí v blízkosti venkovních vedení

Neobvyklé nežádoucí účinky venkovních vedení vvn a zvn byly objeveny při svařování potrubí v roce 2013 v Pardubickém kraji. Bylo zjištěno, že při výstavbě vysokotlakých ocelových plynovodů, v blízkosti vedení velmi vysokého napětí, vznikají při svařování potrubí nevyhovující sváry. Nedokonalost svárů byla přisuzována nežádoucím vlivům blízkého vedení.

V místě nově připravované stavby potrubí jsem provedl odborné měření. Získané hodnoty jsem vyhodnotil a učinil závěr vlivu provozního stavu venkovních vedení na kvalitu svaru potrubí.

2.5 Nežádoucí vlivy kabelových vedení na potrubní systémy

Doposud byly na mezinárodní úrovni popsány nebezpečné vlivy venkovních vedení na kabelové systémy, včetně výpočtů redukčních koeficientů, např. v [21, 22, 23, 35]. Současná energetika má snahu rozvinout přenos elektrické energie na úrovni vvn a zvn s využitím kabelových rozvodů. Současnými komplikacemi s možnou realizací přenosů tímto způsobem je neexistence normativních předpisů pro blízké souběhy a křížení elektrických kabelů vvn a zvn s ostatními inženýrskými sítěmi.

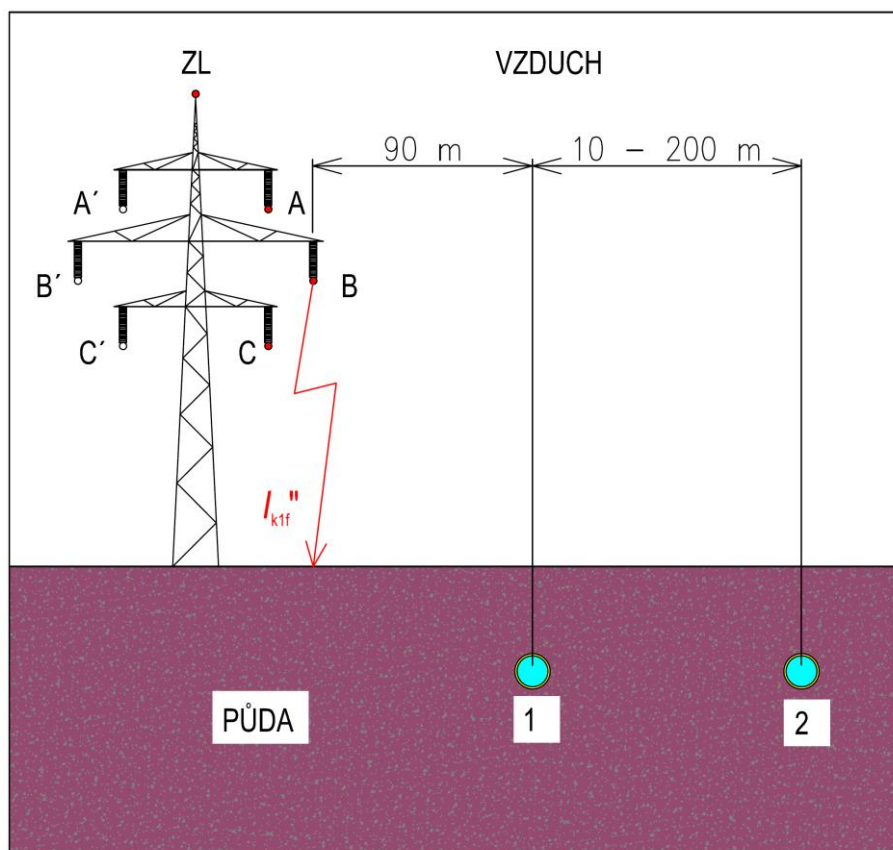
Mým cílem v této oblasti je zpracovat případovou studii za účelem získání relevantních podkladů pro vytvoření normativních předpisů a pro realizaci pilotního projektu stavby kabelového vedení 110 kV v zahraničí. Analyzuji souběhy kabelů vvn a zvn s blízkými potrubními systémy za předpokladu různých vstupních parametrů a dispozičních uspořádání. Navrhuji optimální ochranná opatření a charakterizuji jejich účinky.

3 Analýza vzájemného ovlivňování souběžných potrubí

Analyzoval jsem magnetické pole v okolí dvou v zemi uložených souběžných ocelových izolovaných produktodů DN 300. Základní předpoklady jsou uvedeny v následující kapitole.

3.1 Základní předpoklady pro analýzu magnetického pole

Analyzovaným systémem bude soustava dvojitého nadzemního elektrického vedení a v zemi uložená izolovaná potrubí DN 300, jak je patrné z následujícího obrázku. Uvažované vodiče a potrubí jsou rovnoběžné.



Obr. 3.1 Dispoziční uspořádání systému s dvěma potrubními systémy

Zdroj magnetického pole

Zdrojem magnetického pole je elektrický proud o proudové hustotě $J = 7,96 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ protékající nadzemním vodičem.

Potrubí

Poloměr každého potrubí je $r_p = 0,15 \text{ m}$ a jsou uložena v zemi tak, že jejich středy jsou 2 m pod úrovní terénu. Stěna potrubí je uvažována 20 mm. Materiál potrubí je kov o parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita $\mu_r = 8000$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$

Nechť potrubí blíže k vodiči B je označeno indexem „1“ a vzdálenější od vodiče indexem „2“. Vzájemná vzdálenost bude uvažována od 10 m do 200 m, přičemž poloha potrubí „1“ vzhledem k vodiči B bude konstantní 90 m a proměnná bude pouze poloha potrubí „2“.

Fázové vodiče a zemnicí lano

Fázové vodiče A, B, C, A', B' a C' jsou umístěny nad úrovní terénu, kdy spodní vodiče jsou ve výšce 13 m.

Průřez vodičů o poloměru $r_A = 0,01 \text{ m}$ je

$$S_s = \pi \cdot r_A^2 = \pi \cdot 0,01^2 = 3,14159 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Pro účely vytvoření elektromagnetického pole v okolí ocelových izolovaných potrubí byly uvažovány vodiče elektrického vedení o níže uvedených parametrech.

- Elektrická konduktivita $\gamma = 5,998 \cdot 10^7 \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

Prostředí

Fázové vodiče a zemnicí lano se nachází v prostředí vzduch o základních parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 0 \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$

- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

Vzduch je uvažován i jako médium v potrubí.

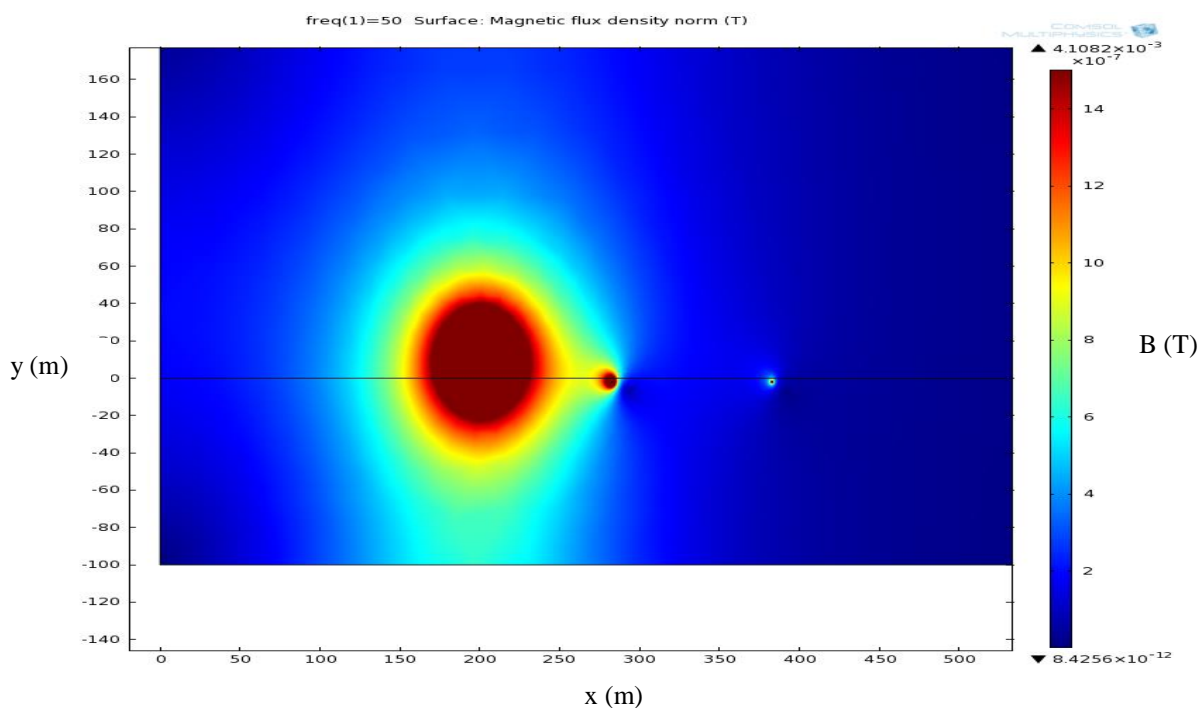
Plynovod a omezující vodič jsou umístěny v prostředí půda o parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 0,5 \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

3.2 Rozložení magnetického pole v okolí souběžných potrubí

V uvažovaném systému ovlivňujícího vodiče a ovlivněných vodičů, jsem analyzoval induktivní vliv na potrubí „2“. Lze konstatovat, že potrubí „1“ má význam omezujícího vodiče, který omezuje působení magnetického pole na potrubí „2“ svým umístěním ve střídavém magnetickém poli a současně vlastním magnetickým polem, jehož zdrojem je časově proměnný elektrický proud, vzniklý jakožto následek naindukovaného napětí.

Rozložení magnetického pole při uvažování obou potrubí vzdálených od sebe 100 m, je patrné z následujícího obrázku.



Obr. 3.2 Magnetické pole fázového vodiče a dvou souběžných potrubí

V následující tabulce 3.1 jsou uvedeny zjištěné hodnoty elektrického proudu potrubím „2“ $\overline{I_{p2}}$ (A) a redukčního koeficientu potrubí „1“ r_1 (-) pro různé vzájemné vzdálenosti obou potrubí a_0 (m).

V daném dispozičním uspořádání se chová každé potrubí vůči ostatním jako omezující vodič. Míra omezení však záleží na vzájemných polohách vzhledem ke zdroji střídavého elektromagnetického pole, tj. porušené fázi. Celkové omezení na straně potrubí v tomto případě je superpozicí dvou účinků. Prvním je deformace elektromagnetického pole, způsobené vložením omezujícího ocelového potrubí do inkriminovaného prostředí, tj. stínění. Druhým účinkem je vytvoření vlastního elektromagnetického pole, jehož zdrojem je časově proměnný elektrický proud, vzniklý jakožto následek naindukovaného napětí z poruchového proudu venkovního vedení. Vlastní elektromagnetické pole působí dle Lenzova pravidla proti poli vytvářeného poruchovým proudem. Výsledné hodnoty jsem zjišťoval při uvažování obou účinků.

Druhý omezující účinek lze popsat následující teorií elektromagnetického pole dle [33]. Z integrálního tvaru 1. Maxwellovy rovnice

$$\oint_c \overline{H} d\vec{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.1)$$

je zřejmé, že zdrojem magnetického pole je vodivý proud I a časově proměnný elektrický indukční tok Ψ . Tento tok vytváří tzv. posuvný (Maxwellův) proud $\frac{d\Psi}{dt}$.

Zdrojem elektrického pole mohou být nejen elektrické náboje, jak ukazuje 3. Maxwellova rovnice

$$\oint_s \overline{D} d\vec{S} = Q, \quad (3.2)$$

ale může jím být i časově proměnný magnetický tok Φ , viz. integrální tvar 2. Maxwellovy rovnice

$$\oint_c \bar{E} d\bar{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.3)$$

kteřá vyjadřuje zákon elektromagnetické indukce. Veličina

$$\oint_c \bar{E} d\bar{l} = u_i \quad (3.4)$$

se nazývá indukované napětí ve smyčce c . Indukční zákon je tedy možné reprezentovat ve tvaru

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.5)$$

2. Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (3.6)$$

matematicky popisuje skutečnost, že elektrické pole vzniká existencí časově proměnného magnetického pole. Dle diferenciálního tvaru lze usoudit, že toto pole je vírové ($\operatorname{rot} \bar{E} \neq 0$). Smyčka c může být chápána jako fiktivní, pak jí tedy proud neprochází, nebo jako vodič o odporu R . V tomto případě jí protéká indukovaný proud

$$i(t) = \frac{u_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.7)$$

Směr indukovaného proudu je definován Lenzovým pravidlem: indukovaný proud má vždy takový směr, že svým magnetickým polem brání časové změně magnetického toku, která vyvolala jeho vznik.

4. Maxwellova rovnice

$$\oint_s \bar{B} d\bar{S} = 0, \quad (3.8)$$

neboli zákon spojitosti magnetického indukčního toku vyjadřuje, že magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou S je roven nule.

Z Maxwellových rovnic lze dokázat, že elektrické pole je zřídlové a magnetické nezřídlové (solenoidární).

Význam označení způsobů omezení v tabulce 3.1 je:

- P_1 je omezení induktivního účinku vložením potrubí „1“ do magnetického pole
- $P_1 + \overline{I_{p1}}$ je omezení induktivního účinku vložením potrubí „1“ do magnetického pole s respektováním elektrického proudu potrubím „1“.

Tab. 3.1 Zjištěné hodnoty při různých vzájemných vzdálenostech souběžných potrubí

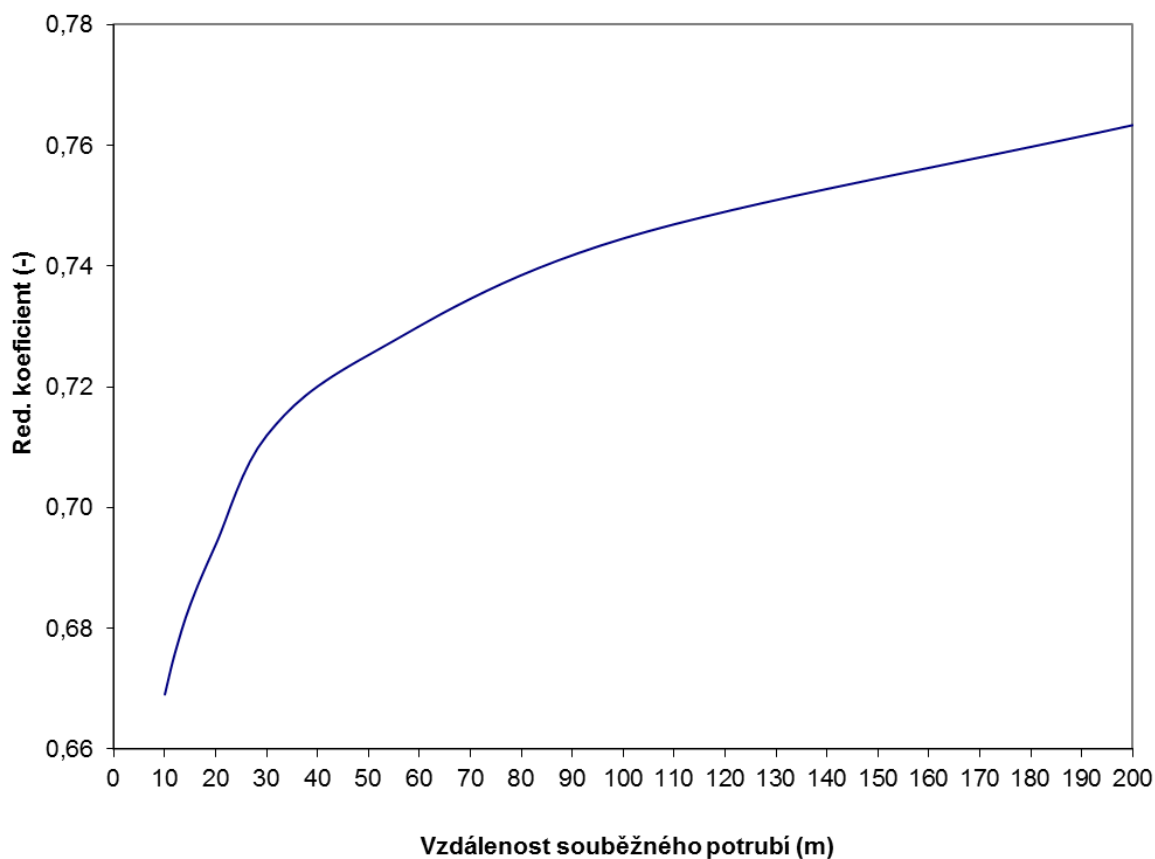
| Vzdálenost potrubí „1“ – potrubí „2“ a_0 (-) | Elektrický proud potrubím 2 $\overline{I_{p2}}$ (A) | | | Redukční koeficient r_1 [-] | Způsob omezení |
|---|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| | $ \overline{I_{p2}} $ | Re ($\overline{I_{p2}}$) | Im ($\overline{I_{p2}}$) | | |
| 10 | 12,789 | 1,824 | 12,658 | 0,674 | P_1 |
| 10 | 12,697 | 1,651 | 12,589 | 0,669 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |
| 12 | 12,541 | 1,804 | 12,410 | 0,681 | P_1 |
| 12 | 12,457 | 1,642 | 12,348 | 0,676 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |
| 15 | 12,135 | 1,775 | 12,004 | 0,688 | P_1 |
| 15 | 12,061 | 1,625 | 11,950 | 0,684 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |
| 30 | 11,061 | 2,099 | 10,860 | 0,713 | P_1 |
| 30 | 11,042 | 2,034 | 10,853 | 0,712 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |
| 50 | 8,806 | 1,966 | 8,583 | 0,728 | P_1 |
| 50 | 8,774 | 1,881 | 8,570 | 0,725 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |
| 100 | 4,950 | 1,534 | 4,707 | 0,747 | P_1 |
| 100 | 4,938 | 1,491 | 4,707 | 0,745 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |
| 200 | 1,519 | 0,690 | 1,353 | 0,763 | P_1 |
| 200 | 1,519 | 0,690 | 1,353 | 0,763 | $P_1 + \overline{I_{p1}}$ |

Majoritní význam omezení induktivního vlivu má poloha omezujícího vodiče. Omezení vlastním magnetickým polem omezujícího vodiče se v daném geometrickém

uspořádání pohybuje do 0,74 % a jeho účinek roste se snižující se vzájemnou vzdáleností sledovaných potrubí.

Níže uvedený graf představuje závislost redukčního koeficientu na vzájemné vzdálenosti obou potrubí při uvažování obou způsobů omezení induktivního vlivu.

Závislost redukčního koeficientu na vzdálenosti souběžného potrubí



Obr.3.3 Redukční koeficienty potrubí „1“ v závislosti na vzájemných vzdálenostech potrubí

Z výše uvedené analýzy vyplývá, že při praktickém posuzování induktivních vlivů dle platných norem má respektování okolních kovových zařízení výrazný vliv na výsledný redukční koeficient. Příznivý omezující vliv souběžných potrubí se uplatňuje i při vzájemných vzdálenostech řádově stovek metrů. Nejvýraznějších účinků je dosaženo

při těsných souběžích, které jsou limitovány ochrannými pásmy jednotlivých energetických zařízení. Zde uvažuji ochranné pásmo 10 m, pro které je omezení induktivních účinků 33,1 %. Ochranou před induktivními účinky o této velikosti je chráněno pouze potrubí „2“.

Podobně potrubí „1“ je chráněno vlivem potrubí „2“, ale v podstatně menší míře.

Provedenou studií jsem přispěl k upřesnění výpočtů induktivních vlivů.

4 Analýza vlivu pozice omezujícího vodiče na redukční koeficient

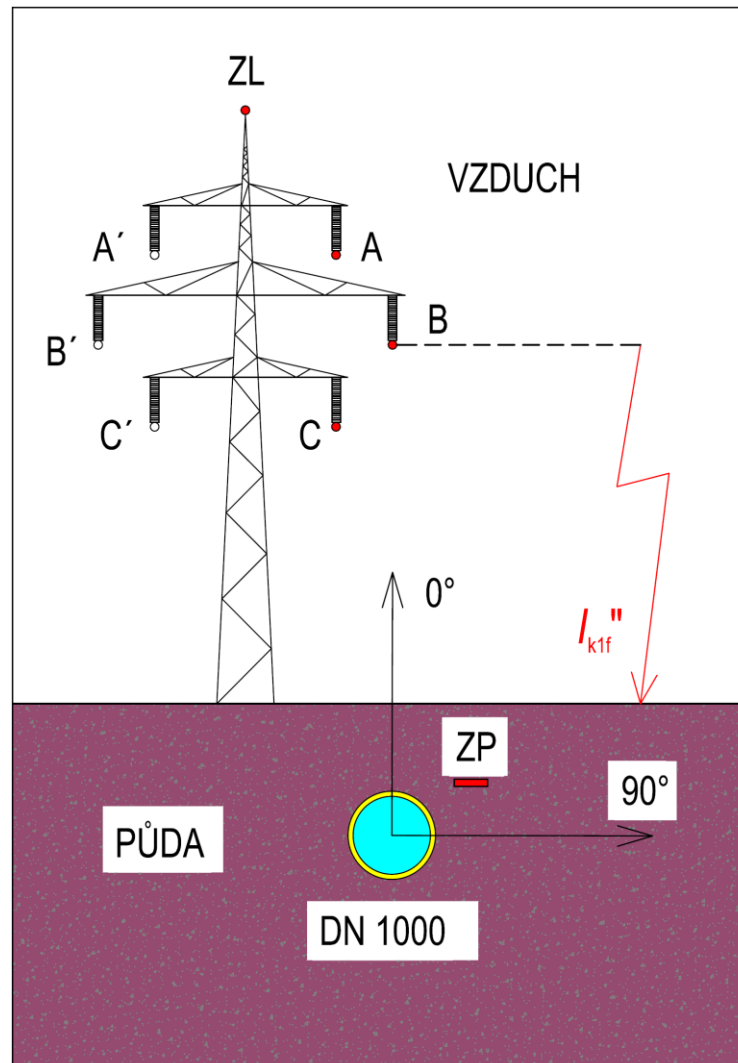
Z hlediska technického a ekonomického, se ochranná opatření, jejichž cílem je eliminace nebezpečných účinků venkovních vedení vvn a zvn, realizují zejména na straně potrubí. Dlouhodobě osvědčeným ochranným opatřením je aplikace omezujícího vodiče, který se ukládá do země v souběhu s chráněným potrubím.

Omezující vodič je využíván ve funkci zemniče a stínění. Z hlediska aktivní katodické ochrany je nepřípustné, aby jakákoliv kovová část katodicky chráněného potrubí byla galvanicky spojena s okolní zemí. Důvodem je zajištění řízení potřebné úrovně potenciálu potrubí, který je zpravidla nenulový. V určitých místech se proto omezující vodič propojuje s potrubím přes tzv. diodový oddělovací člen, kterým se s využitím prahových napětí sérioparalelně řazených diod nastaví úroveň napětí, při kterém se potrubí spojí s omezujícím vodičem, plnícím funkci zemniče.

Projektové dokumentace v sekci katodické ochrany, zabývající se těmito ochranami, neobsahovaly definici pozic omezujících vodičů vzhledem k chráněnému potrubí a ovlivňujícím vedením. Podrobně proto analyzují závislosti poloh omezujícího vodiče na míru omezení induktivních účinků elektrických vedení a zjišťují optimální řešení uložení omezujícího vodiče podél chráněného potrubí.

4.1 Základní předpoklady pro analýzu magnetického pole

Jako zkoumaný systém uvažují uspořádání potrubí DN 1000, fázové vodiče A, B, C, zemnicí lano ZL a omezující vodič ZP, kterým je v praxi nejčastěji zemnicí pásek FeZn 4 x 30 mm. Vodiče a potrubí jsou orientovány rovnoběžně. Dispozice systému je patrná z následujícího obrázku.



Obr. 4.1 Uložení omezujícího vodiče ZP

Zdroj magnetického pole

Zdrojem magnetického pole je jednofázový zkratový proud na fázi B o proudové hustotě $J = 3,18 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$.

Potrubí

Poloměr potrubí je $r_p = 0,5 \text{ m}$ a je situováno tak, že jeho střed je na vertikální ose fázového vodiče B a 2 m pod úrovní terénu. Stěna potrubí je uvažována 20 mm. Materiál potrubí je kov o parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita $\mu_r = 8000$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

Fázové vodiče a zemnicí lano

Fázové vodiče A, B, C, A', B' a C' jsou umístěny nad úrovní terénu, kdy spodní vodiče jsou ve výšce 13 m.

Průřez vodičů o poloměru $r = 0,01$ m je

$$S_s = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,01^2 = 3,14159 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Pro účely vytvoření elektromagnetického pole byly uvažovány vodiče o níže uvedených parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 5,998 \cdot 10^7$ S/m
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

Omezující vodič

Ochranným prvkem potrubí proti účinkům elektromagnetického pole je zemnicí pásek o obdélníkovém průřezu 4 x 30 mm. Tento omezující vodič je umístován vzhledem k potrubí v různých osách v intervalu vzdáleností od stěny potrubí 0,05 m až 10,0 m.

Průřez vodiče je $S_{ZP} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

Uvažuji materiál omezujícího vodiče měď o základních parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 5,998 \cdot 10^7$ S/m
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

Prostředí

Fázové vodiče a zemnicí lano se nachází v prostředí vzduch o základních parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 0$ S/m
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

Vzduch je uvažován i jako médium v potrubí.

Potrubí a omezující vodič jsou umístěny v prostředí půda o parametrech

- Elektrická konduktivita $\gamma = 0,5$ S/m
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1$
- Relativní permitivita $\varepsilon_r = 1$.

4.2 Výsledky omezujících účinků zemnicího pásku v závislosti na jeho pozici

4.2.1 Zemnicí pásek v ose 90°

Zemnicí pásek o rozměrech 4 x 30 mm je umístěn v horizontální ose potrubí DN 1000. Dále bude uveden postup výpočtu pro vzdálenost pásku 35 cm od stěny potrubí. Při uvažování pouze stínících účinků omezujícího vodiče, bude po vzniku jednofázového zkratu na fázi B, proud indukovaný v potrubí:

$$\overline{I_{P2}} = (-1,654 + i \cdot 4,750) \text{ A} \quad (4.1)$$

$$I_{P2} = 5,030 \text{ A} . \quad (4.2)$$

Elektrický proud indukovaný do omezujícího vodiče je

$$\overline{I_{ZP}} = (-0,034 + i \cdot 0,585) \text{ A} \quad (4.3)$$

$$I_{ZP} = 0,586 \text{ A} . \quad (4.4)$$

Pak proudová hustota omezujícím vodičem je

$$\overline{J_{ZP}} = \frac{\overline{I_{ZP}}}{S_{ZP}} = \frac{-0,034 + i \cdot 0,585}{1,2 \cdot 10^{-4}} = (-284,166 + i \cdot 4873,333) \text{ A/m}^2 \quad (4.5)$$

$$J_{ZP} = \frac{I_{ZP}}{S_{ZP}} = \frac{0,586}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 4,881 \text{ kA/m}^2 . \quad (4.6)$$

Elektrický proud indukovaný do zemnicího lana je

$$\overline{I_{ZL1}} = (-68,685 + i \cdot 260,583) \text{ A} \quad (4.7)$$

$$I_{ZL1} = 269,484 \text{ A} \quad (4.8)$$

a proudová hustota zemnicím lanem je

$$\overline{J_{ZL1}} = \frac{\overline{I_{ZL1}}}{S_S} = \frac{-68,685 + i \cdot 260,583}{3,142 \cdot 10^{-4}} = -218,634 + i \cdot 829,464 \text{ kA/m}^2 \quad (4.9)$$

$$J_{ZL1} = \frac{I_{ZL1}}{S_S} = \frac{269,484}{3,142 \cdot 10^{-4}} = 857,794 \text{ A/m}^2. \quad (4.10)$$

Při uvažování toku elektrického proudu zemnicím lanem a omezujícím vodičem bude elektrický proud potrubím

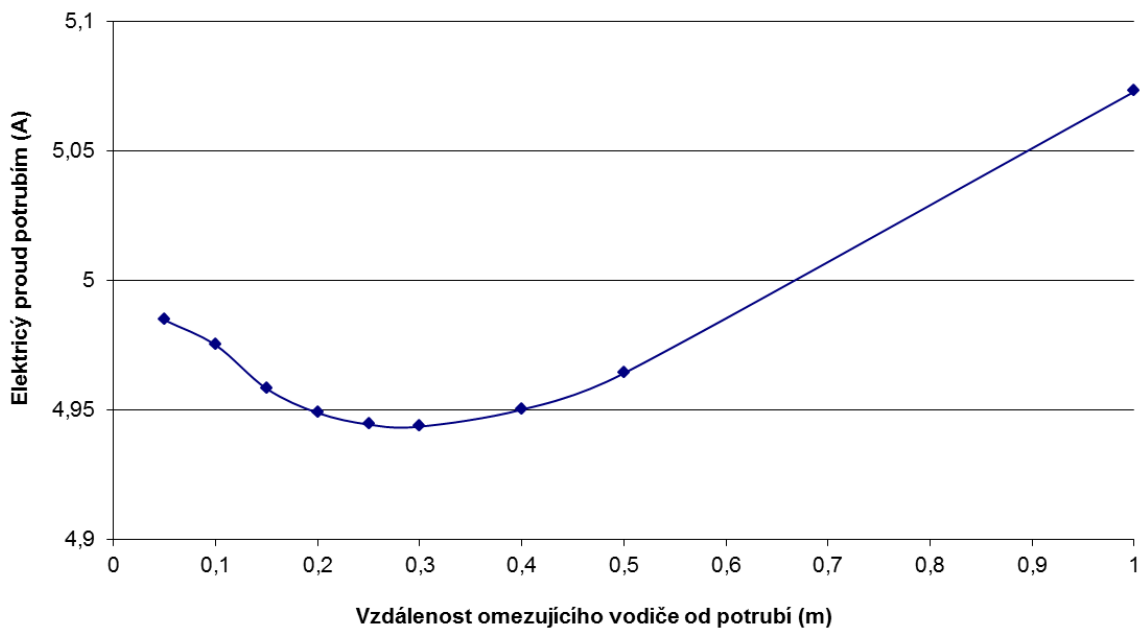
$$\overline{I_p} = (-1,805 + i \cdot 4,606) \text{ A} \quad (4.11)$$

$$I_p = 4,947 \text{ A}. \quad (4.12)$$

Zemnicí pásek byl umístován od 0,05 m do 1 m od stěny potrubí. Pro různé vzdálenosti byl zjišťován elektrický proud indukovaný do potrubí. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.1 a grafické znázornění je patrné z Obr. 4.2.

Tab. 4.1 Vypočítané hodnoty proudů indukovaných do potrubí při různých vzdálenostech omezujícího vodiče

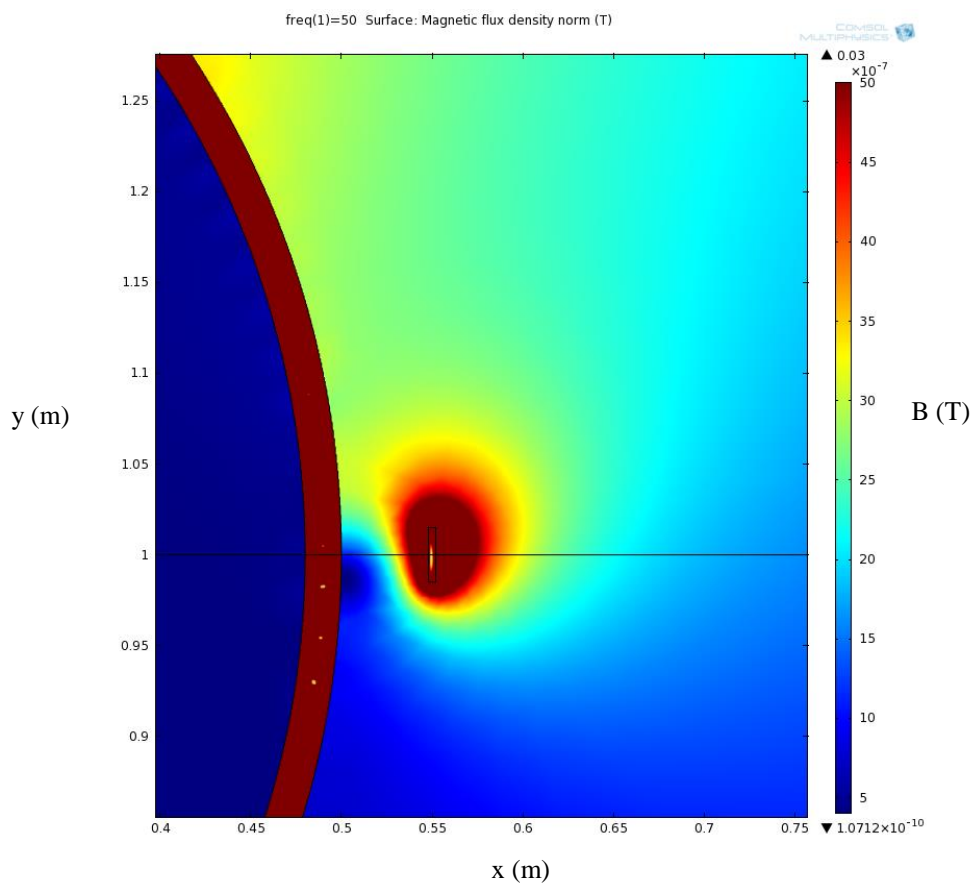
| Vzdálenost potrubí - omezující vodič a_0 (m) | Elektrický proud potrubím $\overline{I_p}$ (A) | | | Redukční koeficient r (-) |
|--|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| | $ \overline{I_p} $ | Re ($\overline{I_p}$) | Im ($\overline{I_p}$) | |
| 1,00 | 5,072 | -1,757 | 4,758 | 0,9430 |
| 0,50 | 4,964 | -1,772 | 4,636 | 0,9228 |
| 0,40 | 4,950 | -1,790 | 4,615 | 0,9202 |
| 0,30 | 4,943 | -1,818 | 4,597 | 0,9189 |
| 0,25 | 4,944 | -1,837 | 4,590 | 0,9191 |
| 0,20 | 4,948 | -1,860 | 4,585 | 0,9199 |
| 0,15 | 4,958 | -1,888 | 4,584 | 0,9217 |
| 0,10 | 4,975 | -1,918 | 4,590 | 0,9248 |
| 0,05 | 4,984 | -1,947 | 4,588 | 0,9266 |

Závislost naindukovaného proudu do potrubí na vzdálenosti omezujícího vodiče

Obr. 4.2 Průběh proudu potrubím v závislosti na vzdálenosti omezujícího vodiče

Nejnižšího elektrického proudu potrubím se dosáhne při dané konfiguraci umístěním zemnicího pásku do vzdálenosti 0,3 m od stěny potrubí a dosáhne se tak nejnižšího redukčního koeficientu.

Omezující vodič vložený do magnetického pole, toto pole ve svém okolí deformuje, viz obr. 4.3.



Obr. 4.3 Detail rozložení magnetické indukce v okolí zemnicího pásku

4.2.2 Zemnicí pásek v ose 45°

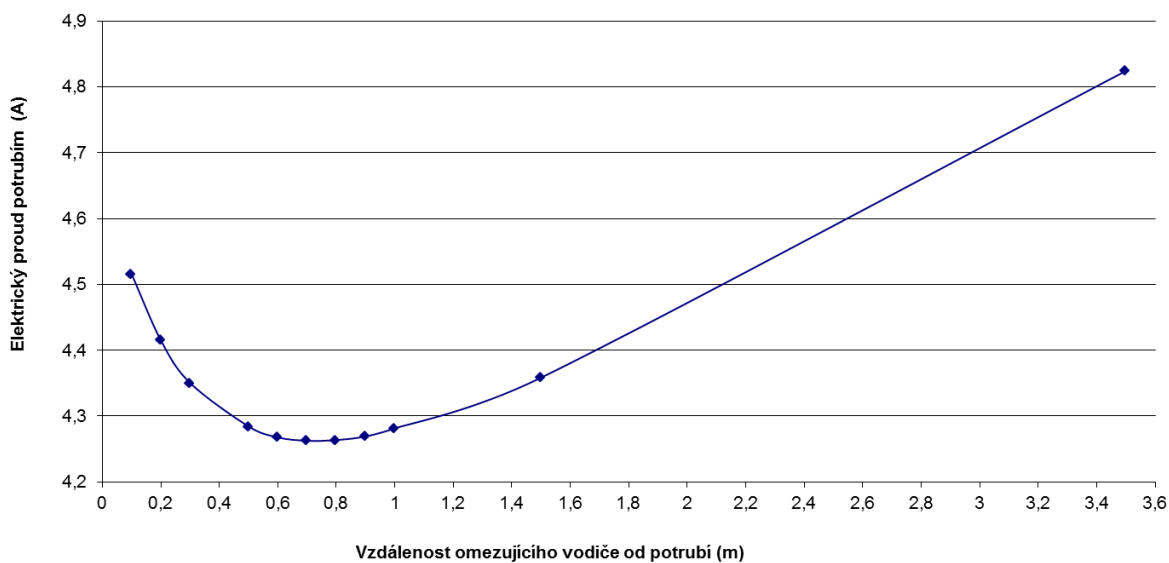
Vzdálenost od potrubí byla volena v intervalu od 0,1 m do 3,5 m za účelem nalezení optimálního umístění omezujícího vodiče. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Z vypočítaných hodnot byl sestrojen graf, viz obrázek 4.4, ze kterého je patrné, že při dané konfiguraci je nejvýhodnější zemnicí pásek umístit 0,7 m od stěny potrubí.

Tab. 4.2 Zjištěné hodnoty při různých vzdálenostech omezujícího vodiče od stěny potrubí

| Vzdálenost potrubí - omezující vodič a_0 (m) | Elektrický proud potrubím \bar{I}_p (A) | | | Redukční koeficient r (-) |
|--|---|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| | $ \bar{I}_p $ | Re (\bar{I}_p) | Im (\bar{I}_p) | |
| 3,5 | 4,824 | -1,615 | 4,546 | 0,897 |
| 1,5 | 4,358 | -1,473 | 4,102 | 0,810 |
| 1 | 4,281 | -1,480 | 4,018 | 0,796 |
| 0,9 | 4,269 | -1,484 | 4,003 | 0,794 |
| 0,8 | 4,264 | -1,497 | 3,992 | 0,793 |
| 0,7 | 4,263 | -1,514 | 3,985 | 0,792 |
| 0,6 | 4,268 | -1,539 | 3,981 | 0,793 |
| 0,5 | 4,284 | -1,577 | 3,983 | 0,796 |
| 0,3 | 4,350 | -1,692 | 4,008 | 0,809 |
| 0,2 | 4,415 | -1,787 | 4,038 | 0,821 |
| 0,1 | 4,516 | -1,915 | 4,089 | 0,839 |

Závislost naindukovaného proudu do potrubí na vzdálenosti omezujícího vodiče od stěny potrubí



Obr. 4.4 Závislost elektrického proudu potrubím na vzdálenosti zemnicího pásu

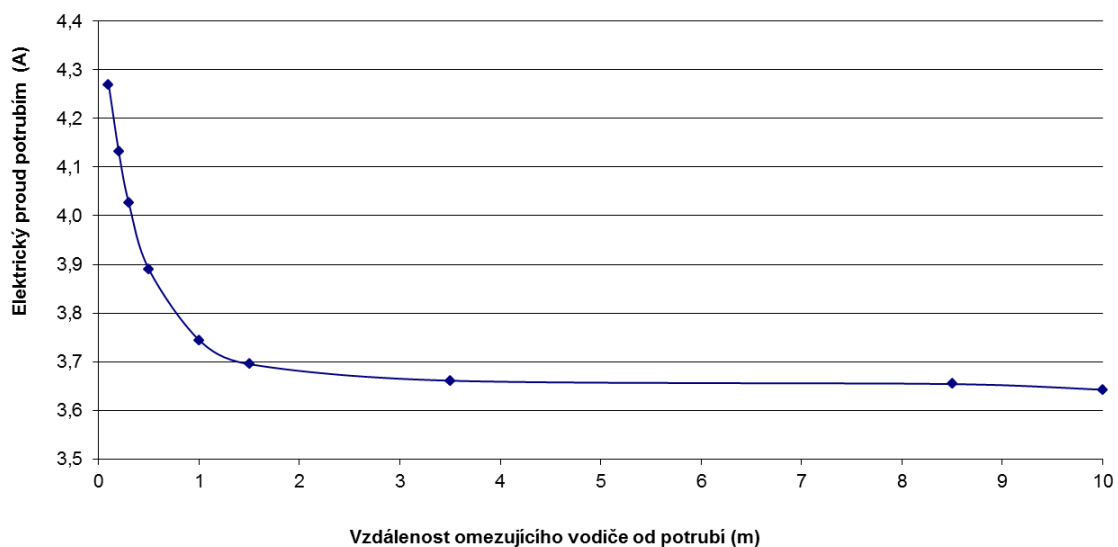
4.2.3 Zemnicí pásek v ose 0°

Hodnoty elektrického proudu tekoucího potrubím při uvažování zemnicího lana, jím tekoucího elektrického proudu a omezujícího vodiče uloženého v různých vzdálenostech od stěny potrubí jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.3 Zjištěné hodnoty při různých vzdálenostech omezujícího vodiče od stěny potrubí

| Vzdálenost potrubí - omezující vodič a_0 (m) | Elektrický proud potrubím \bar{I}_p (A) | | | Redukční koeficient r (-) |
|--|---|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| | $ \bar{I}_p $ | $\text{Re}(\bar{I}_p)$ | $\text{Im}(\bar{I}_p)$ | |
| 10,0 | 3,642 | -1,151 | 3,455 | 0,677 |
| 8,5 | 3,653 | -1,158 | 3,465 | 0,679 |
| 3,5 | 3,661 | -1,169 | 3,469 | 0,680 |
| 1,5 | 3,695 | -1,228 | 3,484 | 0,686 |
| 1,0 | 3,744 | -1,291 | 3,514 | 0,696 |
| 0,5 | 3,890 | -1,461 | 3,605 | 0,723 |
| 0,3 | 4,026 | -1,621 | 3,685 | 0,748 |
| 0,2 | 4,132 | -1,745 | 3,745 | 0,768 |
| 0,1 | 4,269 | -1,917 | 3,814 | 0,793 |

Závislost naindukovaného proudu do potrubí na vzdálenosti omezujícího vodiče od stěny potrubí



Obr. 4.5 Závislost elektrického proudu potrubím na vzdálenosti zemnicího pásku

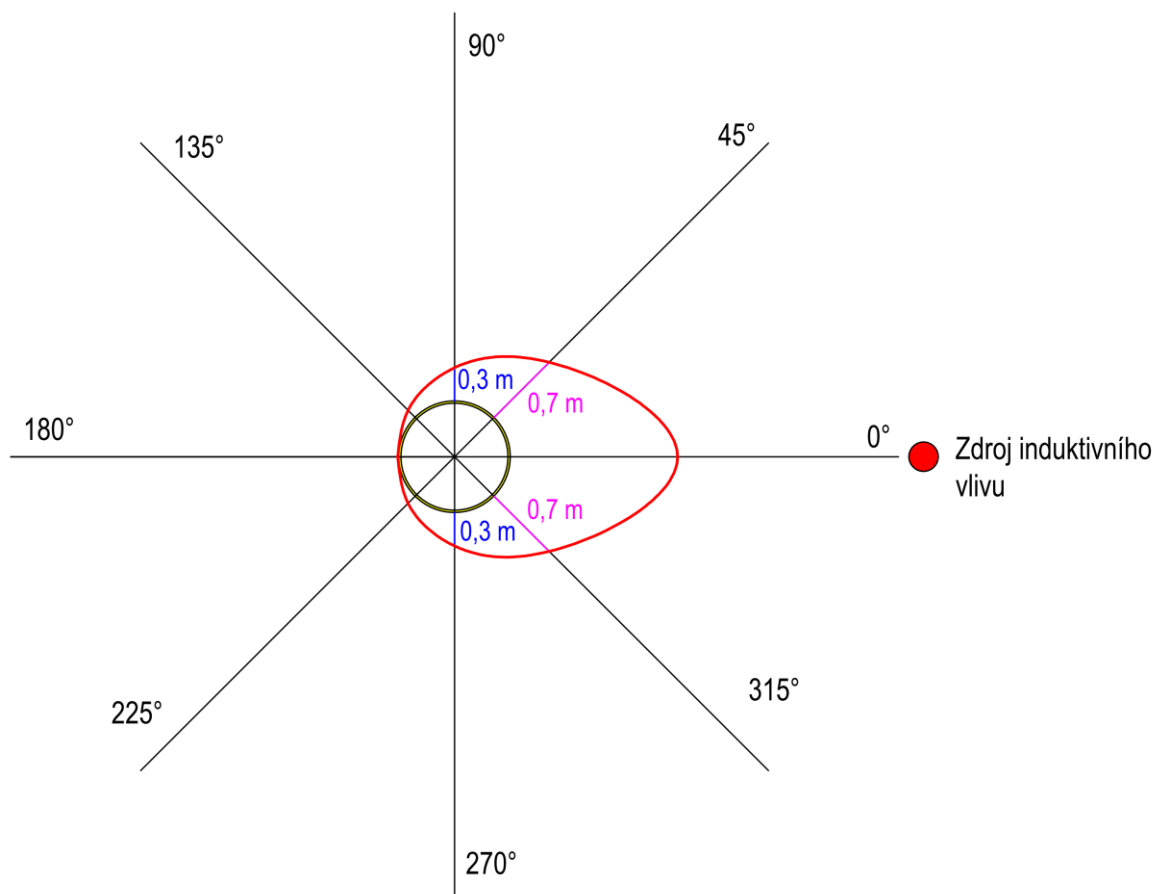
Závislost velikosti elektrického proudu potrubím na vzdálenosti zemnicího pásku od stěny potrubí je prudce exponenciálně klesající do vzdálenosti 1,5 m. S další rostoucí vzdáleností je nárůst účinnosti omezení induktivního vlivu zanedbatelný, jak je patrné z obrázku 4.5. Omezení je tím větší, čím je zemnicí pásek blíže ke zdroji induktivního vlivu.

Uložení zemnicího pásku je v daném případě limitováno hloubkou uložení potrubí. Pro dané případy bude uvažována teoreticky optimální vzdálenost zemnicího pásku od stěny potrubí 3 m.

4.2.4 Souhrn výsledků optimálního uložení zemnicího pásku

Z výsledků provedených výpočtů lze, v soustavě potrubního systému a venkovního vedení vvn s jednofázovou poruchou, sestavit diagram optimálního uložení zemnicího pásku. Diagram je znázorněn na obrázku 4.6, kde optimální polohy jsou zvýrazněny červenou křivkou, jejíž tvar se blíží tvaru elipsy. V praxi budou využívány především části křivek mezi 45° a 90° , resp. mezi 270° a 315° .

Vybraným pozicím zemnicího pásku byly vypočítány hodnoty redukčních koeficientů, které lze uplatnit při návrhu ochranných opatření a následnému aktualizovanému výpočtu dle norem [37 - 39].



Obr. 4.6 Optimální polohy uložení zemnicího pásu

Pro prakticky nejužívanější polohy omezujícího vodiče, jsem dle výše popsaných postupů určil redukční koeficienty s respektováním různých hodnot relativních permeabilit. Obecně většího eliminačního účinku magnetického pole se docílí použitím omezujících vodičů s nižší relativní permeabilitou, jak je patrné z dále uvedené tabulky 4.4.

Tab. 4.4 Vypočítané hodnoty redukčních koeficientů omezujícího vodiče

| Potrubí $\mu_r (-)$ | Omezující vodič $\mu_r (-)$ | Umístění omezujícího vodiče | | Redukční koeficient $r (-)$ |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| | | Poloha (°) | Vzdálenost $a_0 (m)$ | |
| 1 | 1 | 45 | 0,7 | 0,8030 |
| 1 | 200 | 45 | 0,7 | 0,9248 |
| 1 | 1000 | 90 | 0,3 | 0,9888 |
| 200 | 1 | 45 | 0,7 | 0,7890 |
| 200 | 1 | 90 | 0,3 | 0,9154 |
| 200 | 200 | 45 | 0,7 | 0,9119 |
| 200 | 1000 | 45 | 0,7 | 0,9326 |
| 200 | 1000 | 90 | 0,3 | 0,9796 |
| 4000 | 1 | 45 | 0,7 | 0,7922 |
| 4000 | 200 | 45 | 0,7 | 0,9121 |
| 8000 | 1 | 0 | 1,5 | 0,6860 |
| 8000 | 1 | 45 | 0,7 | 0,7923 |
| 8000 | 1 | 90 | 0,3 | 0,919 |
| 8000 | 200 | 45 | 0,7 | 0,9121 |

5 Vliv provozního stavu venkovních vedení na potrubí

Analýza vlivu venkovního vedení při poruchovém stavu na potrubí je dostatečně řešena v [37, 41] a v předchozích kapitolách této práce. Vlivům provozního stavu na potrubní systémy, z hlediska praktických výpočtů potenciálů potrubí, nebyla doposud věnována výrazná pozornost. Potenciály potrubí, způsobené provozem linek vvn a zvn, dosahují běžně jednotek, výjimečně desítek Voltů. V souvislosti s moderními izolacemi potrubí, které se vyznačují nízkou elektrickou konduktivitou, narůstá význam řešení koroze potrubí střídavými proudy od linek vvn a zvn a s tím související predikce hodnot potenciálů potrubí.

Řešených případů souběhů venkovních vedení a potrubí je v praxi nemalé množství. Bylo by proto časově, technicky i finančně náročné analyzovat každý případ s využitím profesionálních výpočetních softwarů jako je např. COMSOL Multiphysics 4.3 nebo Ansys. Komplikovanost je umocněna skutečností, že reálné souběhy nebývají rovnoběžné, ale různoběžné. To vede v profesionálních simulačních programech na řešení úlohy ve 3D. Rozměrné zájmové oblasti v řádech kilometrů kladou na řešení úloh ve 3D nestandardně vysoké technické nároky na hardware počítačů. Z uvedených důvodů jsem navrhl postup výpočtu, který lze s výhodou uplatnit u softwaru na výpočet nebezpečných vlivů vvn, který jsem vyvinul v rámci diplomové práce [41].

5.1 Navržený postup výpočtu pro praktické účely

Následující matematické vztahy byly odvozeny z [37].

Ideální podélné napětí v potrubí vyvolané provozním proudem jedné fáze se určí dle vztahu

$$U_i = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M \cdot I_v \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.1)$$

kde:

U_i (V) ideální podélné napětí

f (Hz) frekvence provozního proudu

M ($\mu\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$) .. součinitel vzájemné indukčnosti mezi dvěma vodiči a zpětným vedením zemí

- I_v (A) provozní proud jedné fáze
 l (km) délka výpočetního úseku souběhu
 r_c (-) celkový redukční činitel.

Pro N výpočetních úseků lze stanovit výsledné ideální podélné napětí vyvolané provozním proudem jedné fáze

$$U_{iv} = \sum_{j=1}^N U_{ij}, \quad (5.2)$$

kde:

- U_{iv} (V) výsledné ideální podélné napětí vyvolané provozním proudem jedné fáze
 N (-) počet výpočetních úseků.

Platí

$$U_i' = \frac{U_i}{l}, \quad (5.3)$$

kde:

- U_i (V) ideální podélné napětí
 U_i' (V · km⁻¹) ... ideální podélné napětí vztažené na jednotku délky
 l (km) délka výpočetního úseku.

Pro vyhodnocení negativních účinků je podstatný potenciál potrubí

$$U_p = \frac{U_i'}{2 \cdot |\gamma|} \cdot \left(1 - e^{-\bar{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.4)$$

kde:

- U_i' (V · km⁻¹) ... ideální podélné napětí vztažené na jednotku délky
 γ (km⁻¹) součinitel šíření
 l (km) délka výpočetního úseku.

Dle terminologie v [37] je potenciálem potrubí myšleno elektrické napětí mezi kovem potrubí a půdou.

Součinitel šíření se určí jako

$$\bar{\gamma} = \beta + j\alpha = \sqrt{(R + jX_L) \cdot (G + jB_c)}, \quad (5.5)$$

kde:

β ($\text{Np} \cdot \text{km}^{-1}$) ... konstanta tlumení

α ($\text{rad} \cdot \text{km}^{-1}$) ... konstanta fáze

X_L ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$) ... měrná induktivní reaktance potrubí

B_c ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$) měrná kapacitní susceptance izolovaného potrubí

R ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$) měrná resistance potrubí

G ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$) měrná konduktance izolovaného potrubí.

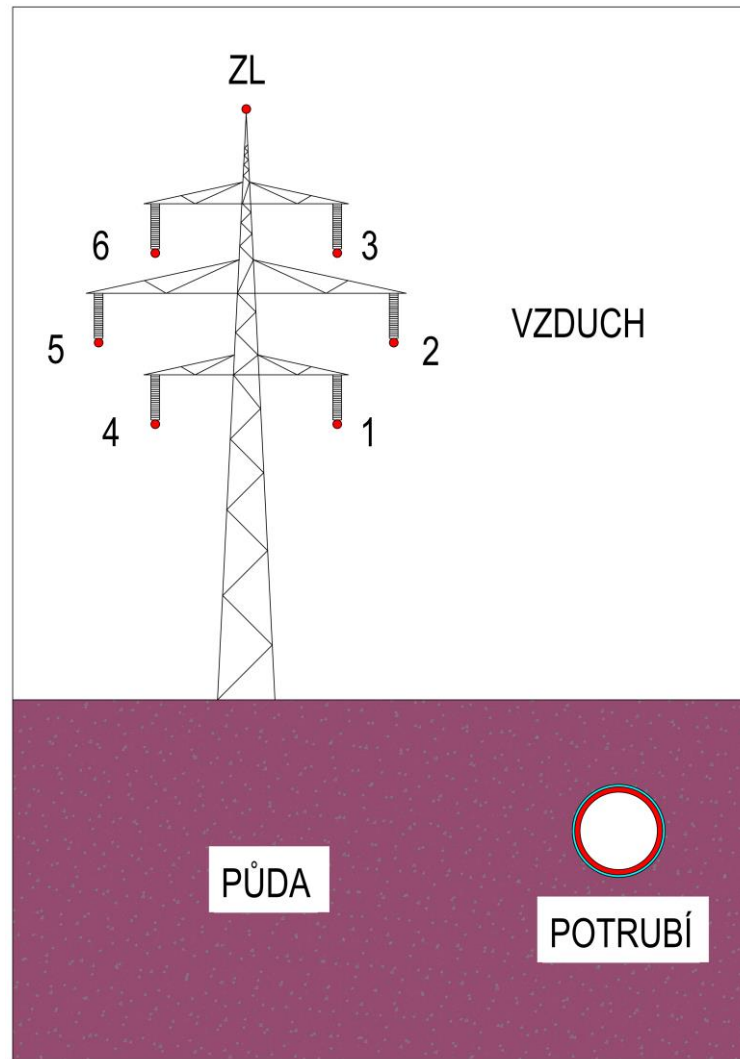
Podrobný popis uvedených parametrů je uveden v [41].

Dále bude uvažováno dispoziční uspořádání dle obrázku 5.1,

kde:

1-6..... fázové vodiče

ZL zemnicí lano.



Obr. 5.1 Model souběhu venkovního vedení a potrubí

Výše uvedené vztahy lze rozšířit pro libovolný počet vodičů o různém uspořádání. Pro ovlivňující vedení ukotvené na stožárech typu soudek jsem do uvedených rovnic zavedl proudovou a geometrickou nesymetrii. Amplitudy provozních proudů jednotlivými vodiči elektrického vedení jsou různé a vzdálenosti mezi potrubím a jednotlivými vodiči taktéž.

$$\overline{I_{v1}} = I_{v1} \angle \varphi_1, \quad (5.6)$$

$$\overline{I_{v2}} = I_{v2} \angle \varphi_2, \quad (5.7)$$

$$\overline{I_{v3}} = I_{v3} \angle \varphi_3, \quad (5.8)$$

$$\overline{I_{v4}} = I_{v4} \angle \varphi_4, \quad (5.9)$$

$$\overline{I_{v5}} = I_{v5} \angle \varphi_5, \quad (5.10)$$

$$\overline{I_{v6}} = I_{v6} \angle \varphi_6, \quad (5.11)$$

$$\overline{I_{vZL}} = I_{vZL} \angle \varphi_{ZL}. \quad (5.12)$$

Následujícím výpočtem se zjistí parametr $x(-)$ pro každý vodič vedení, jehož důležitost je zřejmá z určení součinitele vzájemné indukčnosti M ($\mu\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$). Určí se ze vztahu

$$x = 2,8 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho_z}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.13)$$

kde:

a (m) vzdálenost mezi potrubím a vodičem elektrického vedení

f (Hz) kmitočet

ρ_z ($\Omega \cdot \text{m}$) zdánlivá rezistivita půdy.

Nabývá-li parametr $x(-)$ hodnoty rovné 6 a menší, má smysl dále počítat součinitel vzájemné indukčnosti. V opačném případě se potrubí nachází mimo oblast nebezpečného vlivu a není nutné souběh ověřovat výpočtem. [37] Tento součinitel je obecně z oboru komplexních čísel, ale v praxi je postačující jeho absolutní hodnota, jenž se zjednodušeně určí jako

$$M = 142,5 + 45,96 \cdot x - 1,413 \cdot x^2 - 198 \cdot \ln x. \quad (5.14)$$

S využitím dílčích hodnot součinitele vzájemné indukčnosti a vektorů provozních proudů získáme soustavu rovnic pro ideální podélná napětí v jednom výpočetním úseku od provozních proudů dílčích vodičů vedení za současného respektování proudové a geometrické nesymetrie

$$\overline{U_{i1}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{1p} \cdot \overline{I_{v1}} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.15)$$

$$\overline{U_{i2}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{2p} \cdot \overline{I_{v2}} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.16)$$

$$\overline{U_{i3}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{3p} \cdot \overline{I_{v3}} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.17)$$

$$\overline{U}_{i4} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{4p} \cdot \overline{I}_{v4} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.18)$$

$$\overline{U}_{i5} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{5p} \cdot \overline{I}_{v5} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.19)$$

$$\overline{U}_{i6} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{6p} \cdot \overline{I}_{v6} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.20)$$

$$\overline{U}_{iZL} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{ZLp} \cdot \overline{I}_{vZL} \cdot l \cdot r_c \cdot 10^{-6}, \quad (5.21)$$

Po analogickém přepočtu indukovaných napětí na indukovaná napětí vztažených na jednotku délky, lze stanovit potenciály potrubí v daném výpočetním úseku od provozního proudu každého vodiče vedení.

$$\overline{U}_{p1} = \frac{\overline{U}_{i1}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.22)$$

$$\overline{U}_{p2} = \frac{\overline{U}_{i2}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.23)$$

$$\overline{U}_{p3} = \frac{\overline{U}_{i3}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.24)$$

$$\overline{U}_{p4} = \frac{\overline{U}_{i4}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.25)$$

$$\overline{U}_{p5} = \frac{\overline{U}_{i5}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.26)$$

$$\overline{U}_{p6} = \frac{\overline{U}_{i6}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right), \quad (5.27)$$

$$\overline{U}_{pZL} = \frac{\overline{U}_{iZL}'}{2 \cdot |\overline{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\overline{\gamma} \cdot l}\right). \quad (5.28)$$

Výsledný potenciál potrubí se získá superpozicí dílčích potenciálů potrubí

$$\overline{U}_{pv} = \overline{U}_{p1} + \overline{U}_{p2} + \overline{U}_{p3} + \overline{U}_{p4} + \overline{U}_{p5} + \overline{U}_{p6} + \overline{U}_{pZL}. \quad (5.29)$$

Pro následné vyhodnocení míry ovlivnění potrubí elektrickým vedením se používá absolutní hodnota

$$U_{pv} = \left| \overline{U}_{pv} \right|. \quad (5.30)$$

5.2 Numerické řešení vlivu vedení

Pro účely aplikování výše uvedeného postupu výpočtu a následného ověření správnosti výpočtu měřením jsem zvolil lokalitu v Praze v městské části Stodůlky. Ovlivňujícím vedením je dvojitě vedení 110 kV s označením V383/386 a ovlivněným potrubím je VTL plynovod - trasa č. 114.

Parametry ovlivněného potrubí (trasa č. 114):

- Průměr potrubí $D = 0,2 \text{ m}$
- Tloušťka izolace potrubí $\delta = 0,0025 \text{ m}$
- Průměrná elektrická vodivost izolace $G_p = 300 \mu\text{S} \cdot \text{m}^{-2}$.

Parametry ovlivňujícího vedení (V383/386):

Vedení V383/386 je ukotveno na stožárech typu Soudek. Je uvažována nesouměrná soustava fázových proudů, při které protéká zemním lanem proud o velikosti 5 % hodnoty fázového provozního proudu. Výpočet je proveden za předpokladu nesouměrné soustavy fázových proudů o níže uvedených hodnotách.

$$\overline{I}_{v1} = 778 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{v4} = 778 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{v2} = 800 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{v5} = 800 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{v3} = 822 \angle 120^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{v6} = 822 \angle 120^\circ \text{ A}$$

$$\overline{I}_{vZL} = 39,84 \angle -30^\circ \text{ A}$$

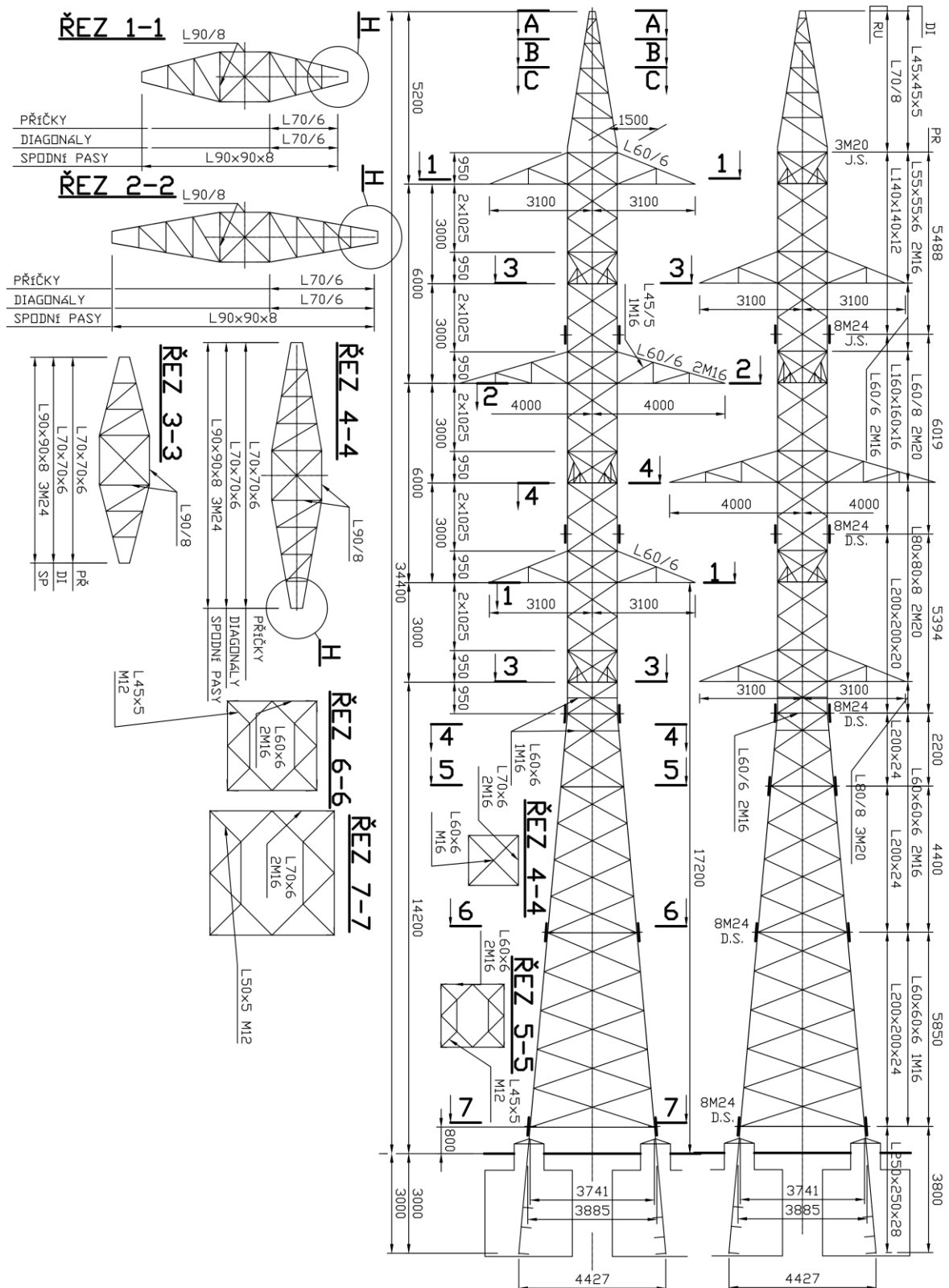
Fázové vodiče jsou označeny indexy 1 až 6, zemnicí lano indexem ZL. V každém výpočetním úseku jsou uvažovány rozměrové parametry stožárů.

Ostatní vstupní údaje:

- Zdánlivá rezistivita půdy $\rho = 25 \Omega\text{m}$
- Celkový redukční činitel $r_c = 0,601$.

Parametry potrubí a venkovního vedení byly poskytnuty jejich provozovateli. Ostatní údaje byly použity v souladu s normativními předpisy [37].

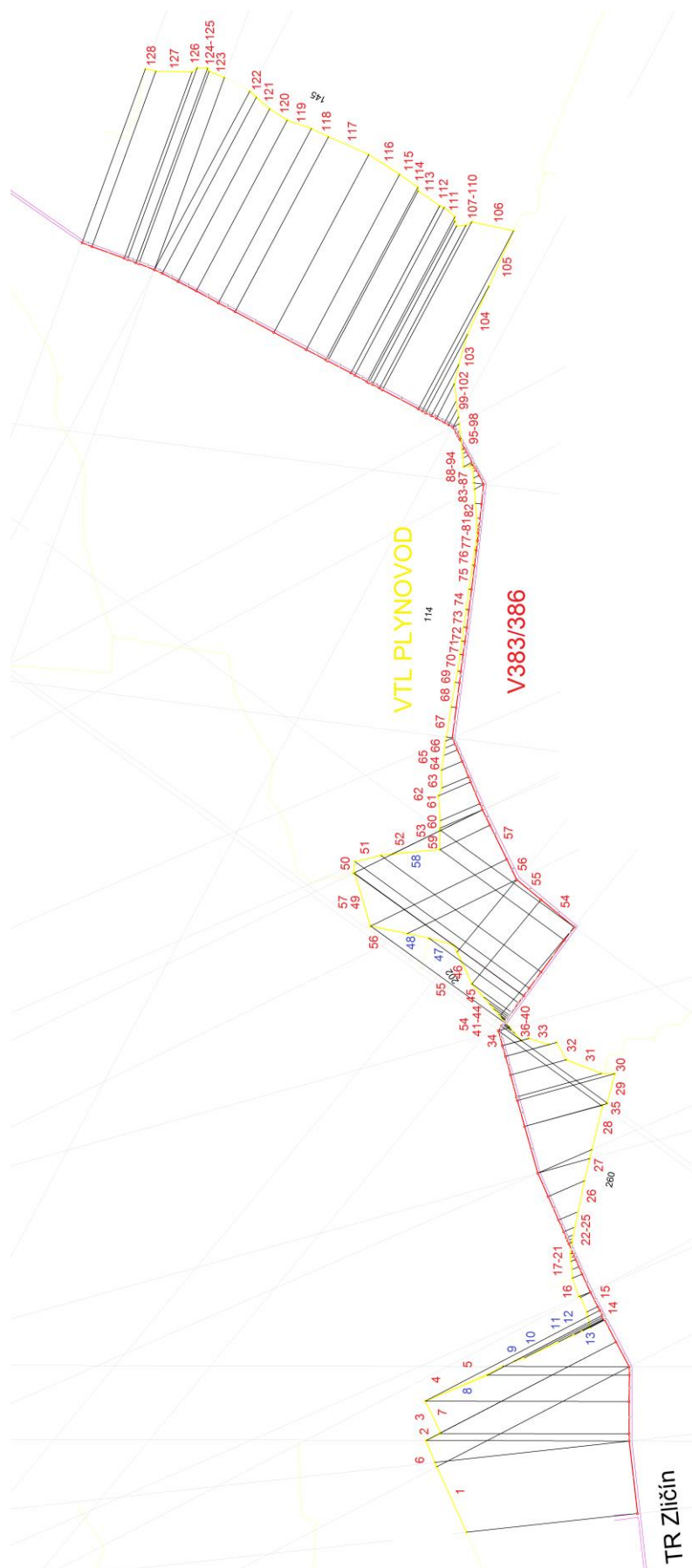
Numerický výpočet byl proveden ve mnou vyvinutém výpočetním softwaru.



Obr. 5.2 Rozměry stožáru soudek

Dispoziční uspořádání:

Souběh je rozdělen na 128 výpočetních úseků, tj. 129 stykových bodů pro určení výsledných hodnot potenciálů potrubí.



Obr. 5.3 Rozdělení souběhu na výpočetní úseky

Po aplikaci vztahů, uvedených v předchozí kapitole, byly získány výsledné hodnoty potenciálů potrubí v každém stykovém bodě ovlivněného potrubí U_{pv} (V), které je způsobeno proudovou a geometrickou nesymetrií vedení V383/386.

Tab. 5.1 Vypočítané hodnoty potenciálů potrubí

| Stykový bod | U_{p1} (V) | U_{p2} (V) | U_{p3} (V) | U_{p4} (V) | U_{p5} (V) | U_{p6} (V) | U_{pZL} (V) | U_{pv} (V) |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 1 | 50,077 | 50,588 | 50,392 | 47,774 | 47,967 | 48,804 | 2,311 | 1,146 |
| 2 | 53,235 | 53,778 | 53,568 | 50,785 | 50,988 | 51,878 | 2,456 | 1,221 |
| 3 | 53,557 | 54,103 | 53,890 | 51,091 | 51,295 | 52,190 | 2,471 | 1,232 |
| 4 | 54,970 | 55,527 | 55,307 | 52,434 | 52,642 | 53,560 | 2,536 | 1,269 |
| 5 | 56,147 | 56,714 | 56,487 | 53,555 | 53,765 | 54,700 | 2,590 | 1,305 |
| 6 | 56,505 | 57,075 | 56,845 | 53,895 | 54,107 | 55,047 | 2,606 | 1,315 |
| 7 | 57,764 | 58,344 | 58,105 | 55,091 | 55,305 | 56,264 | 2,663 | 1,352 |
| 8 | 59,364 | 59,957 | 59,705 | 56,611 | 56,825 | 57,810 | 2,736 | 1,403 |
| 9 | 59,620 | 60,214 | 59,960 | 56,854 | 57,068 | 58,055 | 2,747 | 1,413 |
| 10 | 59,705 | 60,300 | 60,047 | 56,935 | 57,151 | 58,140 | 2,751 | 1,413 |
| 11 | 59,784 | 60,380 | 60,125 | 57,011 | 57,225 | 58,215 | 2,756 | 1,418 |
| 12 | 59,823 | 60,418 | 60,164 | 57,048 | 57,263 | 58,253 | 2,757 | 1,419 |
| 13 | 59,843 | 60,440 | 60,184 | 57,067 | 57,283 | 58,273 | 2,759 | 1,419 |
| 14 | 59,864 | 60,460 | 60,205 | 57,085 | 57,301 | 58,293 | 2,759 | 1,418 |
| 15 | 60,544 | 61,144 | 60,884 | 57,733 | 57,948 | 58,948 | 2,790 | 1,443 |
| 16 | 61,238 | 61,844 | 61,577 | 58,391 | 58,608 | 59,618 | 2,821 | 1,466 |
| 17 | 62,043 | 62,651 | 62,378 | 59,155 | 59,371 | 60,393 | 2,857 | 1,496 |
| 18 | 62,350 | 62,960 | 62,683 | 59,447 | 59,663 | 60,687 | 2,871 | 1,510 |
| 19 | 62,644 | 63,254 | 62,976 | 59,727 | 59,943 | 60,971 | 2,884 | 1,520 |
| 20 | 62,773 | 63,384 | 63,103 | 59,850 | 60,064 | 61,094 | 2,891 | 1,529 |
| 21 | 62,898 | 63,510 | 63,227 | 59,968 | 60,184 | 61,216 | 2,897 | 1,533 |
| 22 | 63,226 | 63,838 | 63,554 | 60,281 | 60,495 | 61,533 | 2,911 | 1,544 |
| 23 | 63,328 | 63,941 | 63,657 | 60,378 | 60,594 | 61,631 | 2,916 | 1,547 |
| 24 | 63,428 | 64,043 | 63,757 | 60,474 | 60,690 | 61,728 | 2,920 | 1,550 |
| 25 | 63,621 | 64,237 | 63,950 | 60,658 | 60,874 | 61,917 | 2,930 | 1,556 |
| 26 | 63,993 | 64,610 | 64,321 | 61,013 | 61,230 | 62,277 | 2,947 | 1,568 |
| 27 | 64,684 | 65,303 | 65,008 | 61,673 | 61,888 | 62,946 | 2,979 | 1,596 |
| 28 | 65,327 | 65,946 | 65,644 | 62,284 | 62,498 | 63,563 | 3,007 | 1,626 |
| 29 | 66,466 | 67,078 | 66,760 | 63,364 | 63,571 | 64,644 | 3,057 | 1,694 |
| 30 | 67,070 | 67,677 | 67,346 | 63,933 | 64,136 | 65,211 | 3,083 | 1,737 |
| 31 | 67,150 | 67,757 | 67,424 | 64,008 | 64,210 | 65,287 | 3,087 | 1,743 |
| 32 | 67,648 | 68,250 | 67,906 | 64,478 | 64,674 | 65,753 | 3,109 | 1,783 |
| 33 | 68,054 | 68,651 | 68,296 | 64,858 | 65,048 | 66,128 | 3,126 | 1,817 |
| 34 | 68,283 | 68,876 | 68,514 | 65,073 | 65,258 | 66,338 | 3,136 | 1,839 |
| 35 | 68,571 | 69,159 | 68,789 | 65,343 | 65,523 | 66,603 | 3,147 | 1,868 |
| 36 | 68,669 | 69,253 | 68,880 | 65,433 | 65,611 | 66,691 | 3,151 | 1,879 |

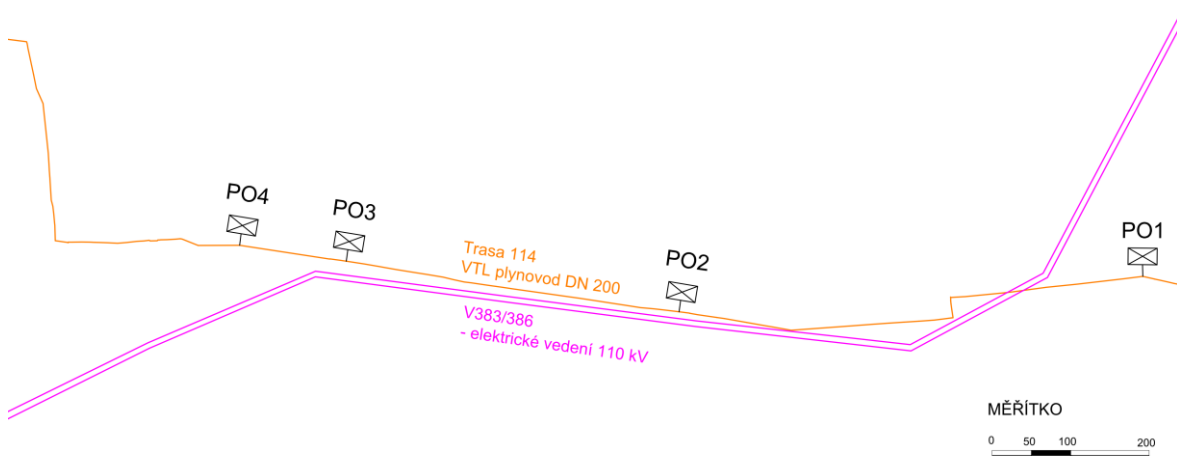
| Stykový bod | U_{p1} (V) | U_{p2} (V) | U_{p3} (V) | U_{p4} (V) | U_{p5} (V) | U_{p6} (V) | U_{pzL} (V) | U_{pv} (V) |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 37 | 68,707 | 69,291 | 68,916 | 65,468 | 65,646 | 66,726 | 3,153 | 1,884 |
| 38 | 68,726 | 69,309 | 68,933 | 65,486 | 65,663 | 66,743 | 3,153 | 1,885 |
| 39 | 68,744 | 69,327 | 68,950 | 65,503 | 65,680 | 66,760 | 3,154 | 1,888 |
| 40 | 68,786 | 69,369 | 68,990 | 65,543 | 65,718 | 66,797 | 3,156 | 1,893 |
| 41 | 68,799 | 69,381 | 69,001 | 65,554 | 65,730 | 66,810 | 3,157 | 1,894 |
| 42 | 68,811 | 69,393 | 69,014 | 65,566 | 65,741 | 66,821 | 3,157 | 1,894 |
| 43 | 68,839 | 69,419 | 69,039 | 65,590 | 65,766 | 66,844 | 3,159 | 1,899 |
| 44 | 68,867 | 69,447 | 69,066 | 65,617 | 65,791 | 66,870 | 3,160 | 1,903 |
| 45 | 68,896 | 69,474 | 69,091 | 65,643 | 65,817 | 66,896 | 3,160 | 1,906 |
| 46 | 68,951 | 69,530 | 69,144 | 65,696 | 65,868 | 66,947 | 3,163 | 1,912 |
| 47 | 69,266 | 69,833 | 69,434 | 65,987 | 66,151 | 67,226 | 3,176 | 1,957 |
| 48 | 69,400 | 69,963 | 69,559 | 66,111 | 66,271 | 67,346 | 3,180 | 1,974 |
| 49 | 69,816 | 70,367 | 69,947 | 66,497 | 66,647 | 67,720 | 3,197 | 2,024 |
| 50 | 70,431 | 70,969 | 70,526 | 67,071 | 67,208 | 68,277 | 3,223 | 2,097 |
| 51 | 70,611 | 71,143 | 70,694 | 67,238 | 67,371 | 68,440 | 3,230 | 2,118 |
| 52 | 71,004 | 71,527 | 71,063 | 67,604 | 67,728 | 68,796 | 3,246 | 2,163 |
| 53 | 71,803 | 72,306 | 71,813 | 68,347 | 68,454 | 69,517 | 3,279 | 2,257 |
| 54 | 72,143 | 72,637 | 72,131 | 68,663 | 68,761 | 69,824 | 3,293 | 2,297 |
| 55 | 73,043 | 73,513 | 72,973 | 69,497 | 69,574 | 70,631 | 3,329 | 2,407 |
| 56 | 73,696 | 74,149 | 73,579 | 70,100 | 70,160 | 71,213 | 3,354 | 2,492 |
| 57 | 74,169 | 74,606 | 74,016 | 70,534 | 70,581 | 71,630 | 3,373 | 2,556 |
| 58 | 75,343 | 75,743 | 75,097 | 71,614 | 71,626 | 72,664 | 3,419 | 2,722 |
| 59 | 75,729 | 76,119 | 75,456 | 71,970 | 71,971 | 73,006 | 3,434 | 2,774 |
| 60 | 76,127 | 76,506 | 75,826 | 72,337 | 72,327 | 73,360 | 3,450 | 2,825 |
| 61 | 76,283 | 76,656 | 75,969 | 72,480 | 72,466 | 73,496 | 3,456 | 2,848 |
| 62 | 76,803 | 77,159 | 76,446 | 72,957 | 72,926 | 73,951 | 3,477 | 2,925 |
| 63 | 76,922 | 77,273 | 76,553 | 73,064 | 73,030 | 74,053 | 3,481 | 2,945 |
| 64 | 77,259 | 77,594 | 76,854 | 73,371 | 73,323 | 74,341 | 3,493 | 3,003 |
| 65 | 77,496 | 77,820 | 77,066 | 73,586 | 73,527 | 74,540 | 3,501 | 3,047 |
| 66 | 77,607 | 77,926 | 77,163 | 73,687 | 73,623 | 74,633 | 3,506 | 3,072 |
| 67 | 77,713 | 78,026 | 77,254 | 73,781 | 73,713 | 74,720 | 3,510 | 3,094 |
| 68 | 78,122 | 78,403 | 77,596 | 74,144 | 74,050 | 75,043 | 3,523 | 3,200 |
| 69 | 78,320 | 78,576 | 77,743 | 74,316 | 74,201 | 75,182 | 3,527 | 3,277 |
| 70 | 78,369 | 78,613 | 77,770 | 74,356 | 74,233 | 75,207 | 3,529 | 3,310 |
| 71 | 78,390 | 78,620 | 77,763 | 74,367 | 74,233 | 75,199 | 3,527 | 3,350 |
| 72 | 78,366 | 78,584 | 77,719 | 74,337 | 74,196 | 75,154 | 3,524 | 3,377 |
| 73 | 78,299 | 78,506 | 77,633 | 74,269 | 74,120 | 75,072 | 3,520 | 3,401 |
| 74 | 78,153 | 78,349 | 77,467 | 74,126 | 73,967 | 74,911 | 3,511 | 3,425 |
| 75 | 77,900 | 78,084 | 77,199 | 73,881 | 73,717 | 74,651 | 3,499 | 3,439 |
| 76 | 77,489 | 77,664 | 76,776 | 73,489 | 73,319 | 74,243 | 3,480 | 3,444 |
| 77 | 77,159 | 77,330 | 76,444 | 73,176 | 73,004 | 73,923 | 3,464 | 3,436 |
| 78 | 76,920 | 77,090 | 76,207 | 72,949 | 72,779 | 73,693 | 3,454 | 3,427 |
| 79 | 76,716 | 76,887 | 76,006 | 72,756 | 72,586 | 73,499 | 3,444 | 3,416 |

| Stykový bod | U_{p1} (V) | U_{p2} (V) | U_{p3} (V) | U_{p4} (V) | U_{p5} (V) | U_{p6} (V) | U_{pZL} (V) | U_{pv} (V) |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 80 | 76,616 | 76,787 | 75,907 | 72,661 | 72,491 | 73,404 | 3,440 | 3,410 |
| 81 | 76,513 | 76,684 | 75,807 | 72,563 | 72,394 | 73,306 | 3,436 | 3,404 |
| 82 | 76,299 | 76,472 | 75,597 | 72,360 | 72,194 | 73,103 | 3,426 | 3,390 |
| 83 | 75,837 | 76,012 | 75,146 | 71,924 | 71,761 | 72,667 | 3,406 | 3,361 |
| 84 | 75,142 | 75,320 | 74,466 | 71,269 | 71,110 | 72,010 | 3,376 | 3,319 |
| 85 | 74,773 | 74,951 | 74,104 | 70,920 | 70,764 | 71,661 | 3,359 | 3,296 |
| 86 | 74,544 | 74,724 | 73,880 | 70,706 | 70,551 | 71,446 | 3,349 | 3,283 |
| 87 | 74,427 | 74,607 | 73,766 | 70,596 | 70,441 | 71,336 | 3,344 | 3,276 |
| 88 | 74,309 | 74,489 | 73,649 | 70,483 | 70,330 | 71,223 | 3,339 | 3,269 |
| 89 | 74,293 | 74,473 | 73,633 | 70,467 | 70,314 | 71,207 | 3,339 | 3,269 |
| 90 | 74,276 | 74,456 | 73,617 | 70,451 | 70,300 | 71,191 | 3,337 | 3,267 |
| 91 | 74,243 | 74,423 | 73,584 | 70,421 | 70,269 | 71,161 | 3,336 | 3,265 |
| 92 | 74,176 | 74,356 | 73,519 | 70,357 | 70,206 | 71,097 | 3,333 | 3,261 |
| 93 | 73,846 | 74,027 | 73,196 | 70,047 | 69,897 | 70,786 | 3,319 | 3,242 |
| 94 | 73,677 | 73,859 | 73,030 | 69,887 | 69,739 | 70,627 | 3,311 | 3,231 |
| 95 | 73,504 | 73,687 | 72,861 | 69,726 | 69,579 | 70,464 | 3,303 | 3,220 |
| 96 | 73,034 | 73,217 | 72,401 | 69,283 | 69,139 | 70,021 | 3,283 | 3,191 |
| 97 | 72,873 | 73,059 | 72,244 | 69,131 | 68,989 | 69,870 | 3,276 | 3,181 |
| 98 | 72,710 | 72,896 | 72,086 | 68,979 | 68,837 | 69,717 | 3,269 | 3,170 |
| 99 | 72,376 | 72,563 | 71,759 | 68,663 | 68,526 | 69,403 | 3,254 | 3,148 |
| 100 | 72,146 | 72,333 | 71,534 | 68,447 | 68,311 | 69,187 | 3,244 | 3,133 |
| 101 | 71,913 | 72,103 | 71,307 | 68,229 | 68,094 | 68,969 | 3,234 | 3,118 |
| 102 | 71,441 | 71,631 | 70,846 | 67,784 | 67,654 | 68,524 | 3,213 | 3,088 |
| 103 | 71,141 | 71,333 | 70,553 | 67,503 | 67,374 | 68,241 | 3,200 | 3,070 |
| 104 | 70,816 | 71,007 | 70,233 | 67,194 | 67,068 | 67,933 | 3,186 | 3,051 |
| 105 | 70,616 | 70,809 | 70,037 | 67,007 | 66,883 | 67,744 | 3,177 | 3,040 |
| 106 | 70,391 | 70,584 | 69,817 | 66,796 | 66,671 | 67,533 | 3,167 | 3,026 |
| 107 | 68,314 | 68,511 | 67,780 | 64,838 | 64,727 | 65,568 | 3,076 | 2,906 |
| 108 | 68,140 | 68,337 | 67,607 | 64,673 | 64,564 | 65,404 | 3,069 | 2,897 |
| 109 | 67,734 | 67,931 | 67,208 | 64,290 | 64,183 | 65,018 | 3,050 | 2,874 |
| 110 | 67,540 | 67,737 | 67,018 | 64,107 | 64,001 | 64,836 | 3,041 | 2,862 |
| 111 | 67,431 | 67,630 | 66,911 | 64,006 | 63,900 | 64,733 | 3,037 | 2,858 |
| 112 | 66,744 | 66,943 | 66,236 | 63,356 | 63,254 | 64,081 | 3,007 | 2,819 |
| 113 | 66,523 | 66,723 | 66,018 | 63,147 | 63,047 | 63,871 | 2,997 | 2,807 |
| 114 | 65,226 | 65,426 | 64,743 | 61,923 | 61,830 | 62,641 | 2,940 | 2,736 |
| 115 | 65,111 | 65,311 | 64,630 | 61,816 | 61,723 | 62,533 | 2,934 | 2,730 |
| 116 | 64,034 | 64,234 | 63,570 | 60,797 | 60,710 | 61,508 | 2,887 | 2,673 |
| 117 | 62,256 | 62,456 | 61,817 | 59,115 | 59,037 | 59,818 | 2,807 | 2,578 |
| 118 | 60,154 | 60,354 | 59,744 | 57,130 | 57,058 | 57,817 | 2,714 | 2,474 |
| 119 | 59,265 | 59,464 | 58,867 | 56,288 | 56,220 | 56,968 | 2,674 | 2,431 |
| 120 | 58,085 | 58,283 | 57,700 | 55,170 | 55,105 | 55,841 | 2,621 | 2,374 |
| 121 | 57,133 | 57,328 | 56,757 | 54,267 | 54,205 | 54,930 | 2,579 | 2,330 |
| 122 | 56,307 | 56,503 | 55,940 | 53,485 | 53,425 | 54,141 | 2,541 | 2,292 |

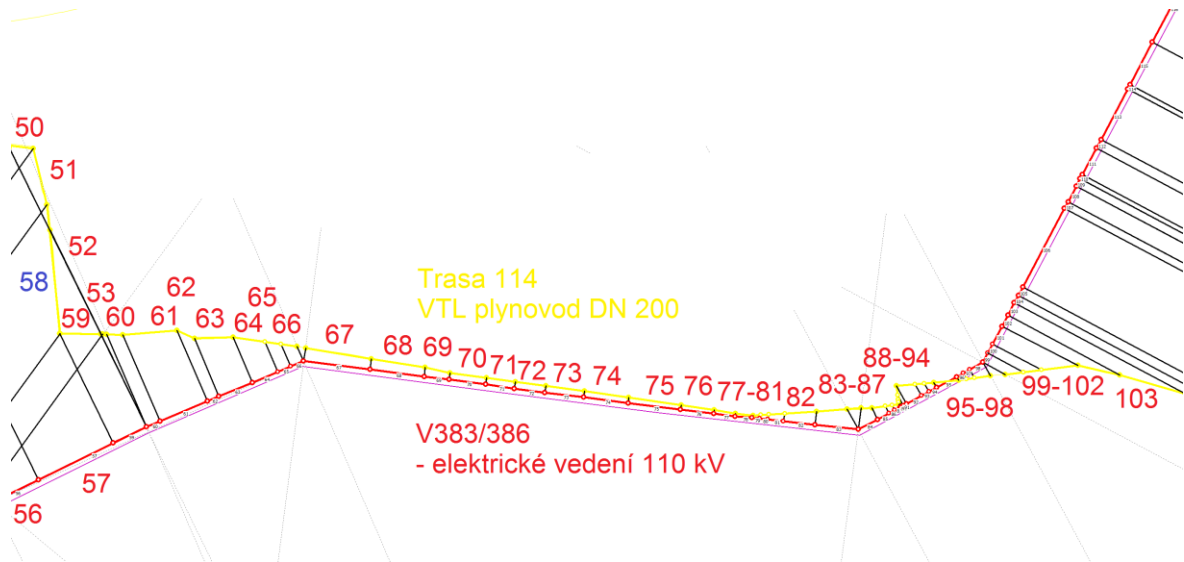
| Stykový bod | U_{p1} (V) | U_{p2} (V) | U_{p3} (V) | U_{p4} (V) | U_{p5} (V) | U_{p6} (V) | U_{pZL} (V) | U_{pv} (V) |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 123 | 55,910 | 56,104 | 55,547 | 53,108 | 53,050 | 53,760 | 2,524 | 2,274 |
| 124 | 55,148 | 55,341 | 54,793 | 52,387 | 52,330 | 53,031 | 2,490 | 2,240 |
| 125 | 55,008 | 55,200 | 54,653 | 52,252 | 52,195 | 52,895 | 2,483 | 2,234 |
| 126 | 54,594 | 54,784 | 54,243 | 51,860 | 51,804 | 52,498 | 2,464 | 2,216 |
| 127 | 54,431 | 54,621 | 54,081 | 51,707 | 51,651 | 52,342 | 2,457 | 2,210 |
| 128 | 52,881 | 53,067 | 52,542 | 50,234 | 50,181 | 50,854 | 2,387 | 2,143 |
| 129 | 52,401 | 52,584 | 52,065 | 49,778 | 49,725 | 50,392 | 2,366 | 2,125 |

5.3 Praktické měření

Měření jsem provedl dne 5.7.2016 mezi 11:00 a 13:00. V kooperaci s provozovatelem VTL plynovodu jsem provedl měření potenciálu potrubí celkem ve čtyřech měřících bodech. Pro galvanické napojení na potrubí jsem využil stávající propojovací objekty PO1 až PO4 na trase plynovodu. Měřicí přístroj byl připojen na svorkovnici propojovacího objektu a na přenosnou referenční elektrodu CSE, která byla v místě měření galvanicky spojena se zemí. Měřenými hodnotami byly potenciál potrubí (efektivní hodnota střídavého napětí o frekvenci 50 Hz) a hodnota zapínacího potenciálu (stejnoseměrná hodnota napětí), která byla měřena z informačních důvodů.



Obr. 5.4 Dispoziční uspořádání analyzovaného případu



Obr. 5.5 Výpočetní úseky v inkriminované oblasti

Použitá měřící zařízení:

- Měřicí přístroj: SUMMIT85, digital multimeter, SN 14803020001
- Přenosná referenční elektroda CSE

Tab. 5.2 Hodnoty zjištěné měřením

| Místo | Zapínací potenciál změřený E_{onm} (V) | Zapínací potenciál průměrný E_{onm}' (V) | Výsledný potenciál potrubí změřený U_{pvm} (V) | Výsledný potenciál potrubí průměrný U_{pvm}' (V) |
|-------|--|--|--|--|
| PO1 | -1,559 -1,782 -1,701 | -1,681 | 0,170 0,150 0,140 | 0,153 |
| PO2 | -1,602 -1,810 -1,790 | -1,734 | 0,300 0,288 0,220 | 0,269 |
| PO3 | -1,96 -2,15 -2,017 -1,78 -1,8 | -1,941 | 0,670 0,720 0,630 0,613 0,75 | 0,677 |
| PO4 | -1,970 -2,006 -1,895 | -1,957 | 0,648 0,601 0,580 0,730 0,563 | 0,624 |

5.4 Souhrn výsledků a porovnání dílčích metod

Každému místu měření PO1 až PO4 odpovídá konkrétní stykový bod z provedeného výpočtu. Z níže uvedené tabulky jsou pro daná místa zřejmé změřené a vypočítané hodnoty. Měření bylo provedeno v době, kdy elektrickým vedením protékal proud o průměrné hodnotě 166 A. Výpočet potenciálu potrubí byl však proveden pro nejnepříznivější možný stav, tj. pro proud o průměrné hodnotě 800 A. Analyzovaný systém lze považovat za lineární, proto je možné na základě přímé úměrnosti určit výsledné hodnoty potenciálu potrubí pro ovlivňující proud 166 A.

Tab. 5.3 Porovnání hodnot změřených a vypočítaných

| Místo měření | Stykový bod - výpočet | Výsledný potenciál potrubí průměrný U_{pvm} (V) | Výsledný potenciál potrubí vypočítaný pro $I_v=800$ A U_{pv} (V) | Výsledný potenciál potrubí vypočítaný pro $I_v=166$ A U_{pv} (V) |
|--------------|-----------------------|---|--|--|
| PO1 | 102 | 0,153 | 3,088 | 0,641 |
| PO2 | 75 | 0,269 | 3,439 | 0,714 |
| PO3 | 67 | 0,677 | 3,094 | 0,642 |
| PO4 | 64 | 0,624 | 3,003 | 0,623 |

Místo měření PO1 se nachází v úseku VTL plynovodu s asfaltovou izolací z roku 1954. Průměrná elektrická vodivost této izolace je několikanásobně vyšší než u dnes používaných polyethylenových izolací (např. $G_p = 1800 \mu S \cdot m^{-2}$). Místo měření PO2 se nachází na rozhraní asfaltové a polyethylenové izolace. V místech PO1 a PO2 nelze brát vypočítané hodnoty v úvahu, protože vstupní údaje pro potrubí odpovídají parametrům polyethylenové izolace z roku 2004, tj. pro místa měření PO3 a PO4.

V místech měření PO3 a PO4 byla zaznamenána velice pozitivní shoda změřených hodnot a hodnot zjištěných provedeným výpočtem. Potrubí v daném úseku bylo v roce 2004 rekonstruováno a opatřeno polyethylenovou izolací, jejíž elektrické vlastnosti lze považovat podél trasy za konstantní. Průměrná elektrická vodivost této izolace, se při stáří

delším než 10 let, ustálí na průměrné hodnotě $G_p = 300 \mu S \cdot m^{-2}$. S touto hodnotou byl výpočet proveden.

Zpracovaný postup výpočtu v kapitole 5.3 lze považovat za velice přesný a efektivní nástroj pro predikci potenciálů potrubí, zapříčiněných provozními stavy venkovních vedení. S výhodou jej lze uplatnit ve fázi projektové přípravy stavby elektrických vedení nebo ocelových izolovaných potrubí. Předpokladem získání věrohodných výsledků je však nutná znalost řady vstupních parametrů elektrických vedení, ocelových izolovaných potrubí a okolního prostředí. Na základě dlouhodobého zkoumání uvedených parametrů je však dnes možné relevantní vstupní data určit s dostatečnou přesností.

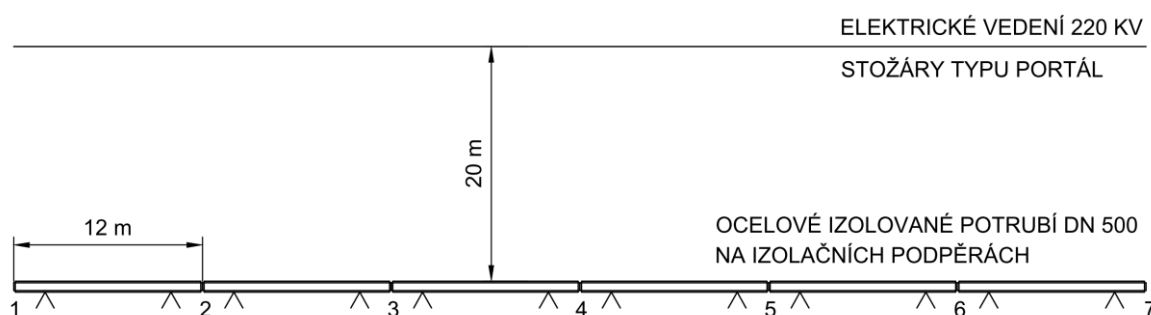
Výhodou navrženého numerického řešení je možnost řešit i komplikované souběhy, u kterých může docházet i k několikanásobnému křížení tras. Řešení takového netriviálního případu s využitím softwaru na výpočet elektromagnetického pole, by vedlo na řešení úlohy ve 3D, což by bylo vzhledem k rozsáhlému zájmovému území obtížně proveditelné.

6 Vliv provozního stavu venkovních vedení na montáž potrubí

Byly zaznamenány případy, kdy montáž potrubí v blízkosti nadzemního vedení vvn či zvn je doprovázena nežádoucími jevy. V roce 2013 byla rekonstruována první část VTL plynovodu DN 500 na trase Pardubice - Sulovice. V úseku, kde bylo nové potrubí na izolačních podpěrách v blízkém souběhu s vedením 220 kV, byla kvalita provedených svarů vyhodnocena jako značně neuspokojivá. Tyto komplikace byly přisuzovány nežádoucím vlivům blízkého vedení vvn.

V souvislosti s připravovanou realizací druhé části VTL plynovodu v úseku Spytovice - Horušice, jsem zkoumal příčiny nežádoucích jevů měřením.

V souběhu s předmětným vedením 220 kV byly připraveny tři zkušební vzorky potrubí, umístěny na izolačních podpěrách. Každý vzorek sestával ze šesti dvanáctimetrových trub, svařených v jeden galvanický celek. Potrubí bylo z vnější strany opatřeno PE izolací. Neizolovanými místy byly pouze konce dílčích trub, které jsou určeny pro provedení svarů. Tato místa, označena v níže uvedeném obrázku čísly 1 až 7, jsem s výhodou využil pro připojení měřících přístrojů, případně pro realizaci uzemnění potrubí.



Obr. 6.1 Zkoumaná soustava vzorku potrubí a linky 220 kV

Měření jsem provedl dne 12.12.2016 mezi 13:00 a 16:00. S využitím osciloskopu jsem měřil časové průběhy napětí mezi potrubím a zemí pro různé varianty stavu potrubí

- neuzemněné potrubí
- uzemněný jeden konec potrubí
- uzemněné oba konce potrubí.

Měření jsem provedl vždy pro všechny měřící body potrubí.

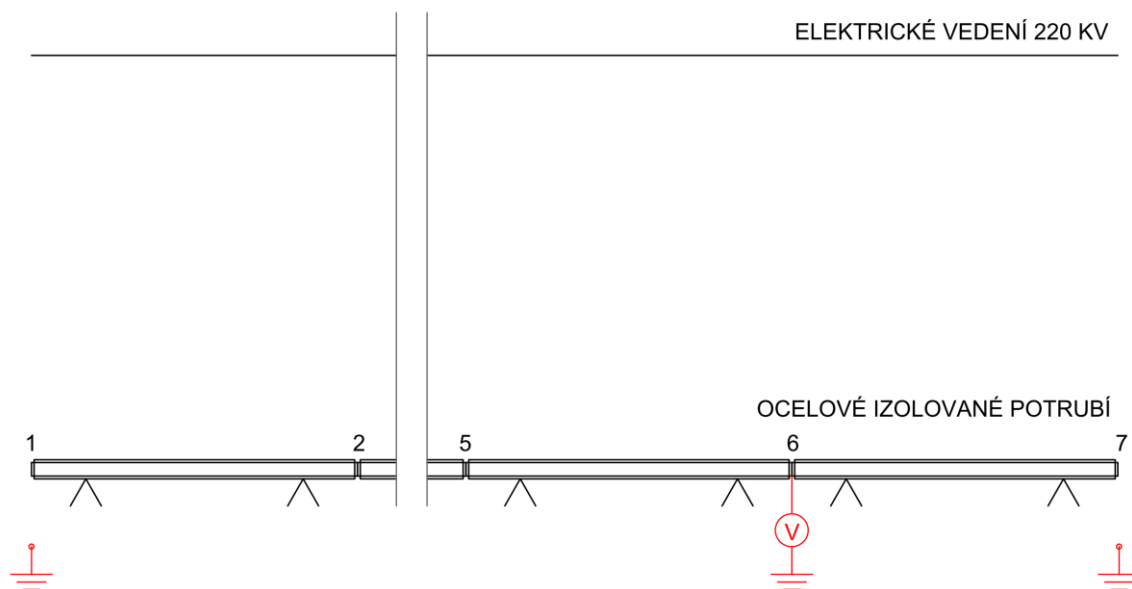
Použitá měřící zařízení a měřící pomůcky:

- Osciloskop: LeCroy, waveJet 314, 100 MHz Oscilloscope, 1GS/s, vstupy: $1\text{M}\Omega$, 20 pF, 400 Vpk
- Měřící přístroj: SUMMIT85, digital multimeter, SN 14803020001
- Měřící přístroj: METREL MI 3123
- Mobilní generátor 400/230 V
- Stíněné měřící kabely, svorky, zemnicí tyče.

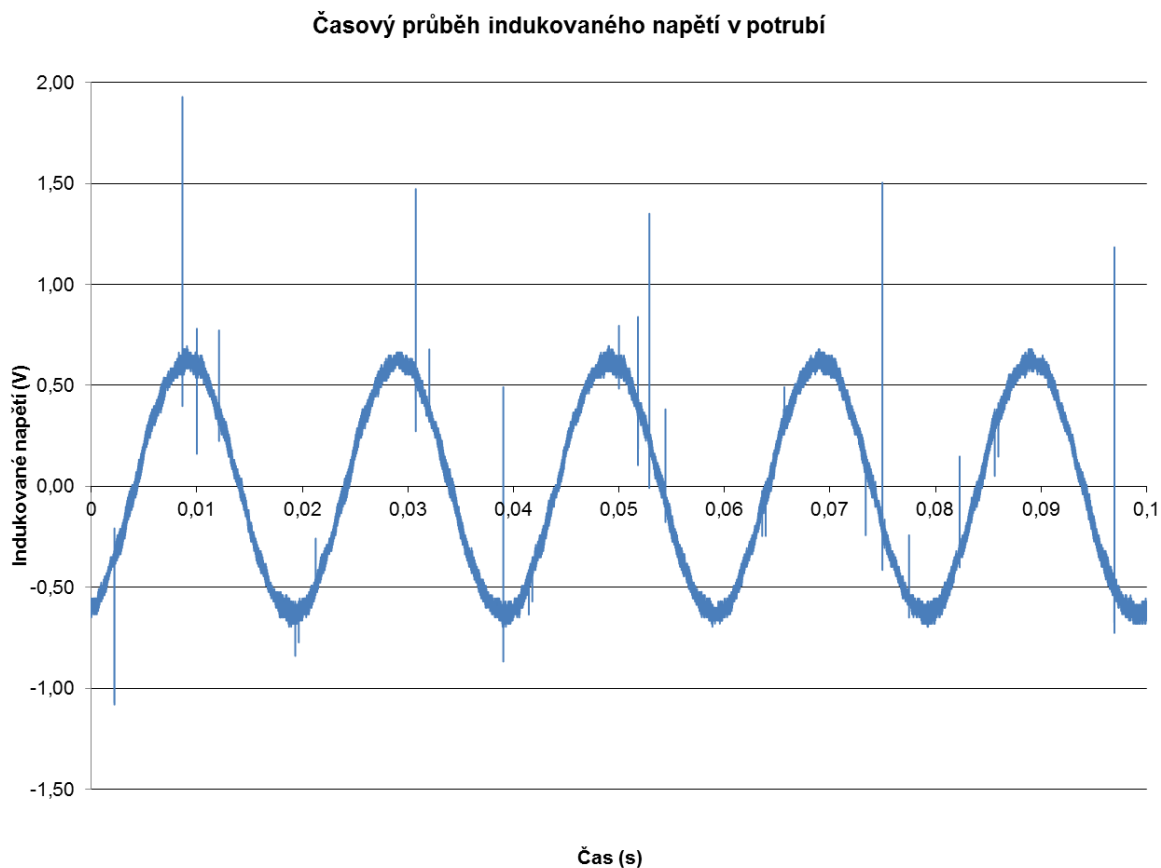
6.1 Praktické měření

Měření č. 1:

Osciloskop, jenž měřil časový průběh napětí na potrubí, byl připojen v bodě č. 6. Potrubí bylo neuzemněno.

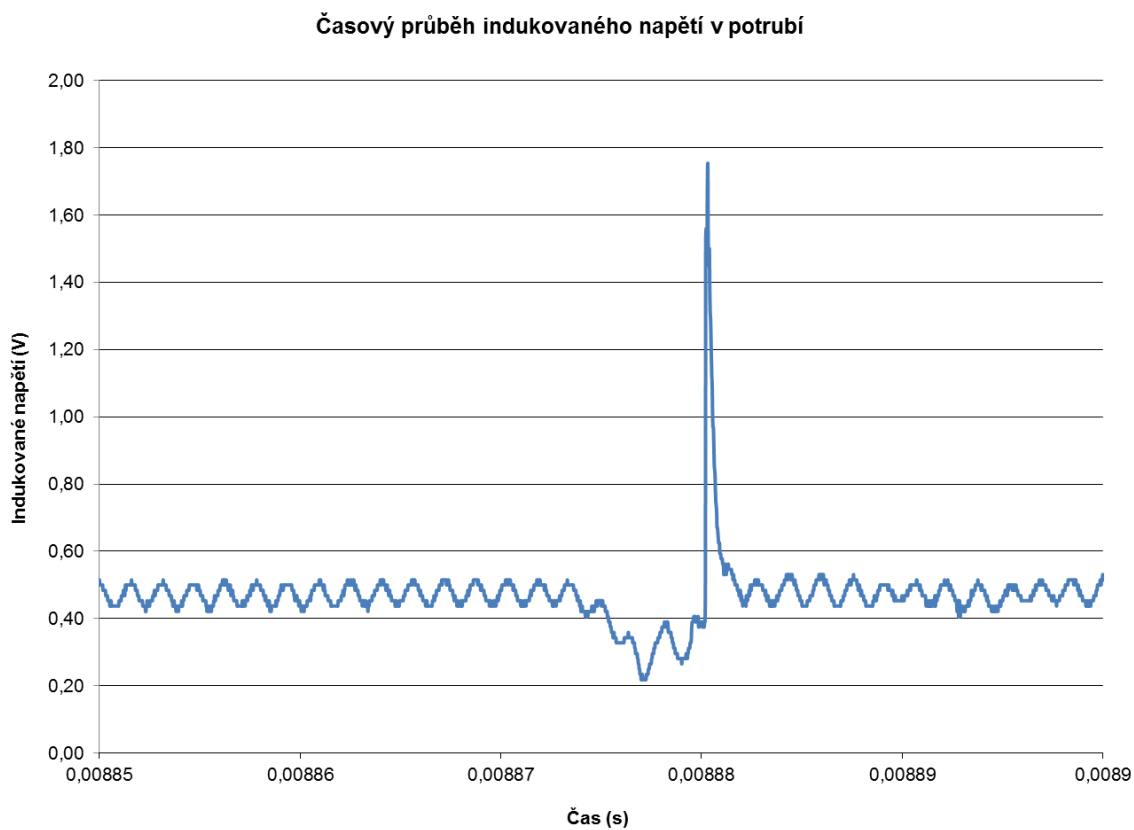


Obr. 6.2 Konfigurace zkoumané soustavy pro měření č. 1



Obr. 6.3 Časový průběh zjištěného napětí pro měření č. 1

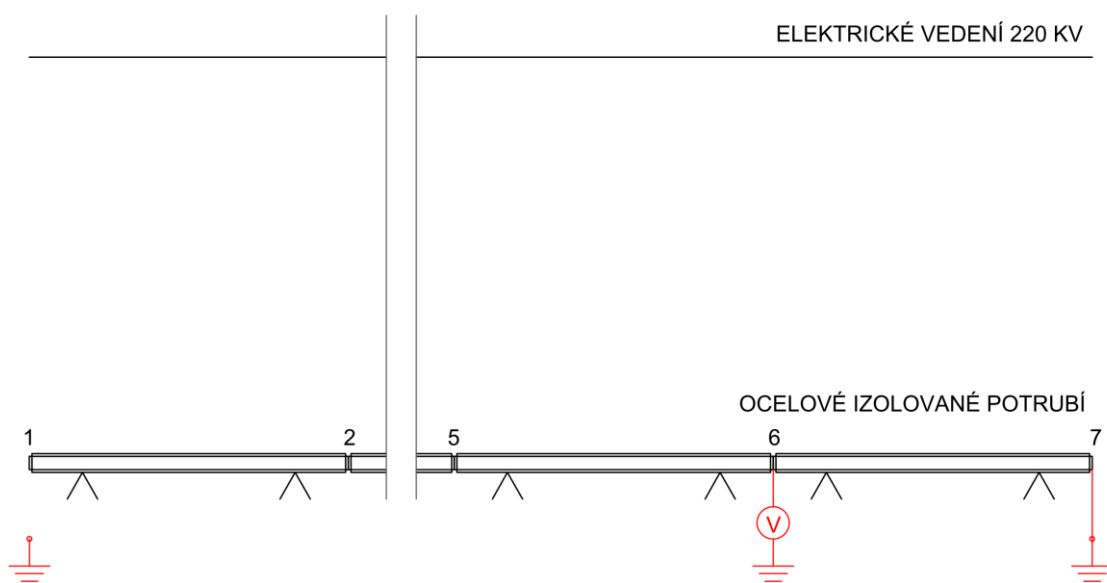
Časový průběh napětí v potrubí je harmonický o frekvenci 50 Hz a amplitudě 0,616 V. Zjistil jsem, že na základní harmonickou napětí jsou superponovány pulzy, jejichž velikosti dosahují v daném případě až téměř trojnásobku amplitudy základní harmonické. Detail jednoho z pulzů je patrný z následujícího grafu.



Obr. 6.4 Detail pulzu

Měření č. 2:

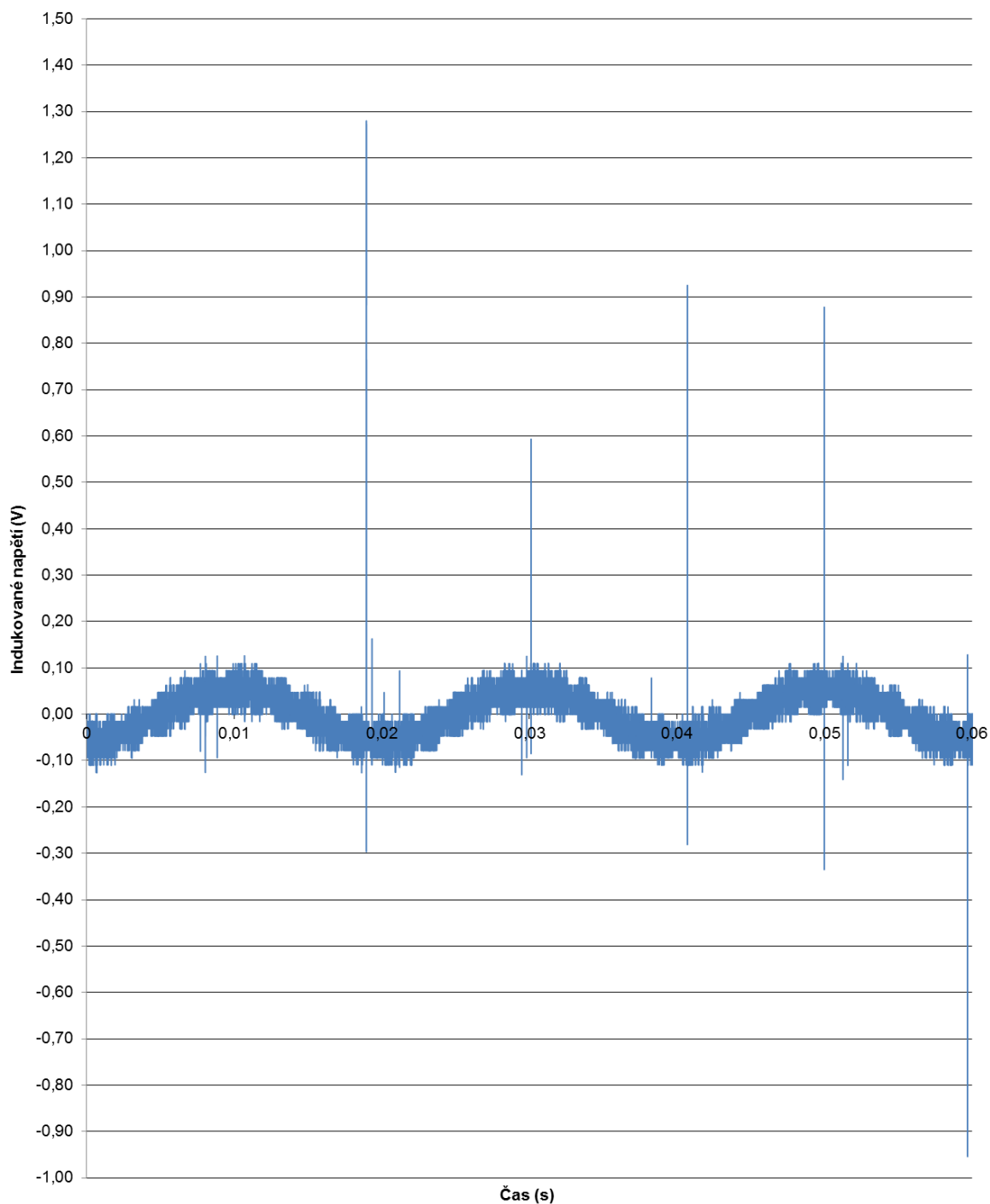
Osciloskop byl připojen v bodě č. 6, přičemž potrubí bylo uzemněno v bodě č. 7.



Obr. 6.5 Konfigurace zkoumané soustavy pro měření č. 2

Uzemněním jednoho konce potrubí bylo docíleno snížení hodnot indukovaného napětí v měřicím bodě č. 6 přibližně na šestinu, zatímco velikost superponovaných pulzů se téměř nezměnila.

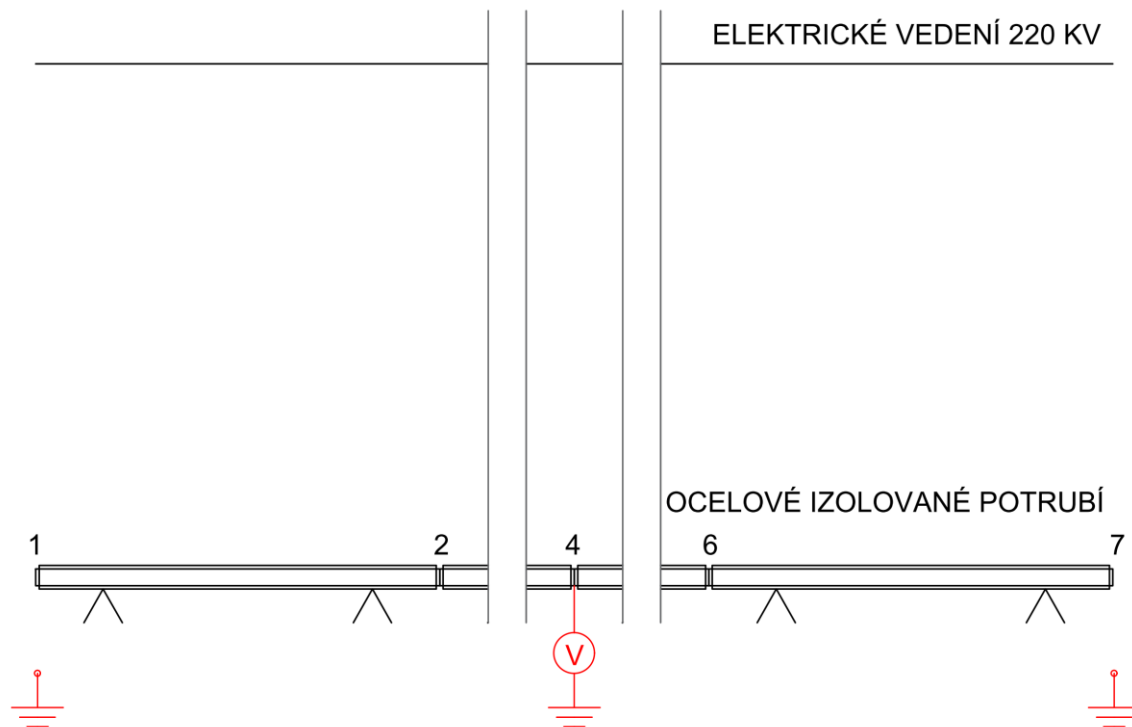
Časový průběh indukovaného napětí v potrubí



Obr. 6.6 Časový průběh zjištěného napětí pro měření č. 2

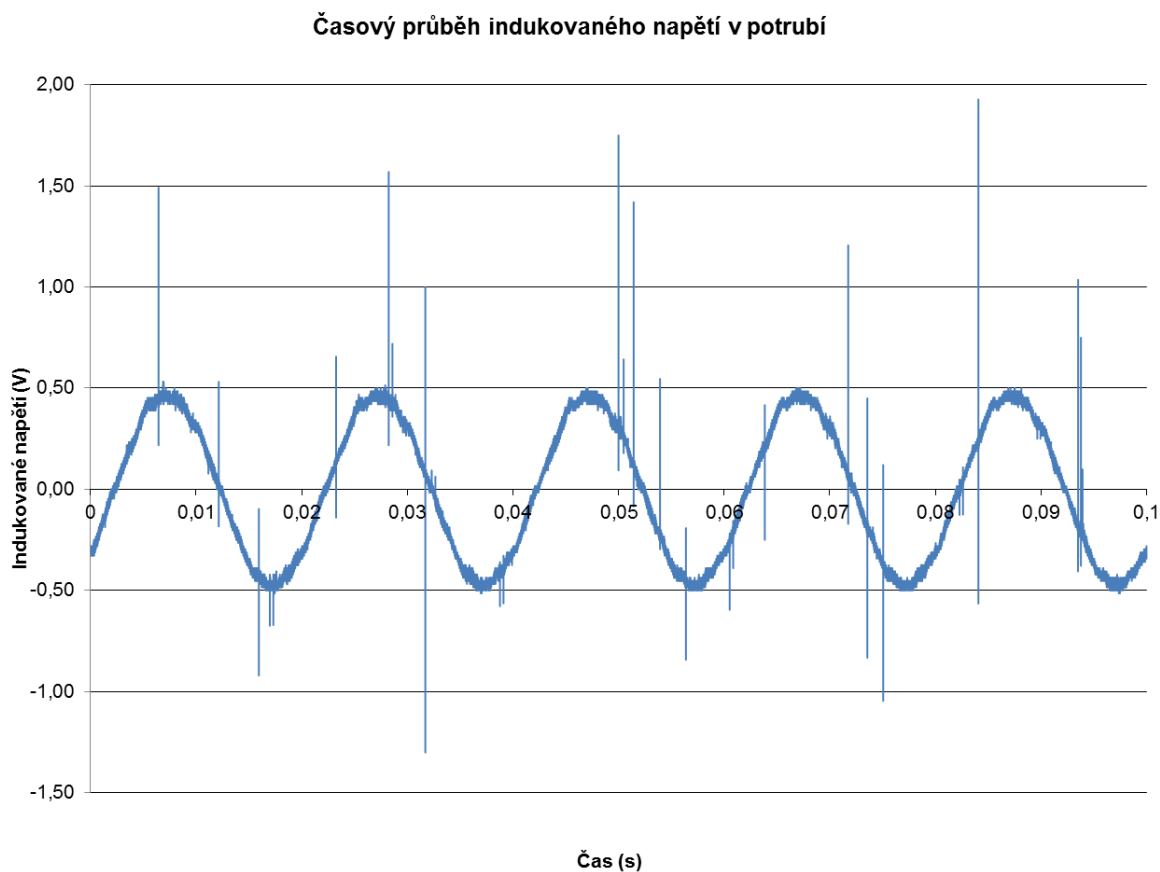
Měření č. 3:

Osciloskop byl připojen v bodě č. 4, tj. uprostřed zkoumaného vzorku. Potrubí nebylo uzemněno v žádném bodě.



Obr.6.7 Konfigurace zkoumané soustavy pro měření č. 3

Časový průběh měřeného napětí je patrný z následujícího grafu. Frekvence základního harmonického průběhu napětí je 50 Hz a amplituda byla zjištěna 0,468 V. Velikost superponovaných pulzů je srovnatelná s předchozími měřeními.



Obr. 6.8 Časový průběh zjištěného napětí pro měření č. 3

Ostatní provedená měření:

Celkem jsem provedl osmnáct podrobných měření pro různé konfigurace měřeného obvodu. Největší hodnoty napětí byly zjištěny pro variantu neuzemněného potrubí, měřené na koncích vzorku. Všechny měření získané časové závislosti napětí jsou charakteristické harmonickým průběhem o frekvenci 50 Hz a superponovanými pulzy. S ohledem na uvedenou analogii výsledků uvádím rozbor pouze třech základních měření z celkově provedených osmnácti.

6.2 Souhrn výsledků a zhodnocení vlivu na kvalitu svarů potrubí

V blízkosti stávajícího venkovního vedení 220 kV jsem provedl podrobné měření časových průběhů napětí na připravených vzorcích potrubí, umístěných na izolačních podpěrách. Zjištěná napětí mají harmonický charakter o frekvenci 50 Hz. Tato skutečnost potvrzuje existenci vlivu blízkého vedení, jehož fázovými vodiči protékal provozní proud o frekvenci 50 Hz v rozmezí hodnot od 70 A do 115 A. Amplitudy zjištěných napětí však v žádném případě nepřevýšily hodnotu 0,7 V. Uvedené harmonické průběhy napětí v potrubí jsou následkem induktivního a kapacitního vlivu. Lze předpokládat, že amplituda napětí bude narůstat s narůstající délkou souběhu, tj. s narůstajícím počtem svařovaných trub. Učiněnými závěry se však prokázalo, že induktivní a kapacitní vlivy venkovního vedení při provozním stavu, nejsou příčinou degradace kvality svarů.

Na všech harmonických průbězích napětí se však objevují pulzy o velikosti až 1,5 V a délce okolo 1 μ s. Po zpětné analýze postupu a provedení měření, nepřisuzuji existenci pulzů chybě měření, přestože měření probíhalo v silném elektromagnetickém poli vedení 220 kV. Vzhledem k parametrům pulzů a blízkého vedení, usuzuji, že jejich výskyt v časovém průběhu indukovaného napětí je následkem vzniku korony na předmětném vedení vvn. Korona v daném případě představuje zdroj vysokofrekvenčního rušení, které se v podobě pulzů superponuje na harmonické napětí indukované v potrubí. Doporučuji v dalším řešení dané problematiky prozkoumat odolnost systémů svařecích zařízení před rušivými signály korony vedení vvn a zvn.

7 Analýza vlivu kabelů na blízká potrubí

7.1 Základní předpoklady pro analýzu magnetického pole

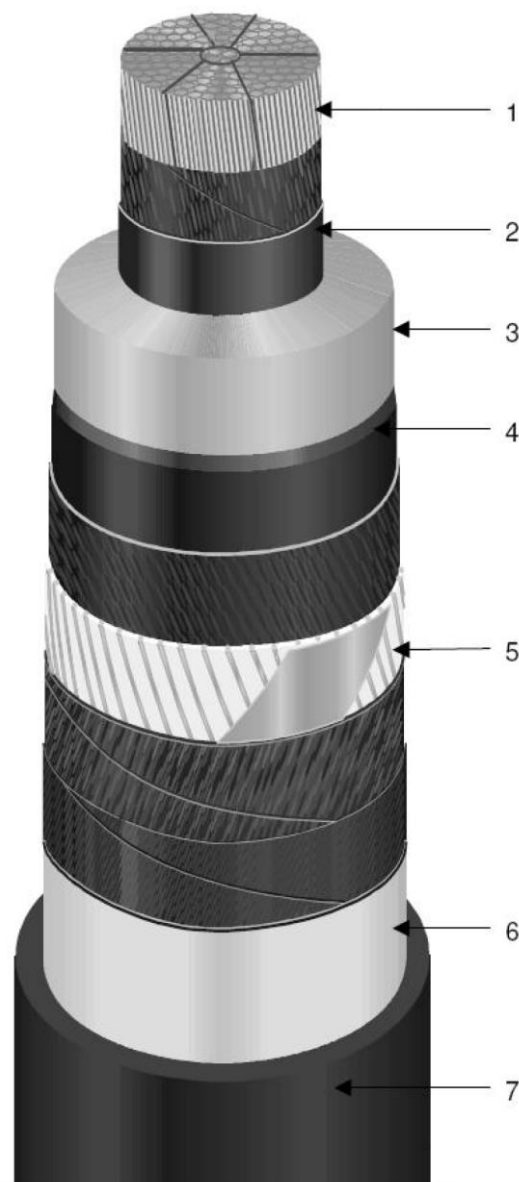
Pro analýzu nežádoucích vlivů kabelů na blízká v zemi uložená ocelová izolovaná potrubí je uvažováno kabelové vedení 110 kV. Fázové kabely jsou uloženy na betonovém základu a zality betonem. V případě nutnosti se pro omezení účinků elektromagnetického pole na okolní úložná zařízení používá omezující vodič, který se pokládá v těsné blízkosti k fázovým kabelům.

Fázový kabel

Uvažovaným fázovým kabelem je kabel A2XS(FL)2Y 1x1600RMS/200-64/110 kV, jehož jednotlivé vrstvy jsou patrné z následujícího obrázku. Je uvažováno třífázové kabelové vedení, kde fáze jsou označeny jako A, B a C.

Tab. 7.1 Elektrické parametry fázového kabelu

| Název | Hodnota | jednotka | Poznámka |
|--|---------|----------|----------|
| Sdružené jmenovité napětí | 110 | kV | - |
| Kmitočet | 50 | Hz | - |
| Max. ne-adiabatický zkratový proud | 152.3 | kA | - |
| Max. dovolený proud vodiče | 913 | A | 174 MVA |
| Max. ne-adiabatický zemní proud stíněním | 37.5 | kA | - |



Obr. 7.1 Fázový kabel

Tab. 7.2 Vrstvy fázového kabelu

| Číslo | Materiál | Průměr D (mm) | Tloušťka stěny t (mm) |
|-------|----------|-----------------|-------------------------|
| 1 | Al | 49,6 | - |
| 2 | PE | 52,6 | 1,5 |
| 3 | XLPE | 88,6 | 18,0 |
| 4 | PE | 90,8 | 1,1 |
| 5 | Cu | 92,2 | 0,7 |
| 6 | Al | 92,6 | 0,2 |
| 7 | HDPE | 108,8 | - |

Omezující vodič

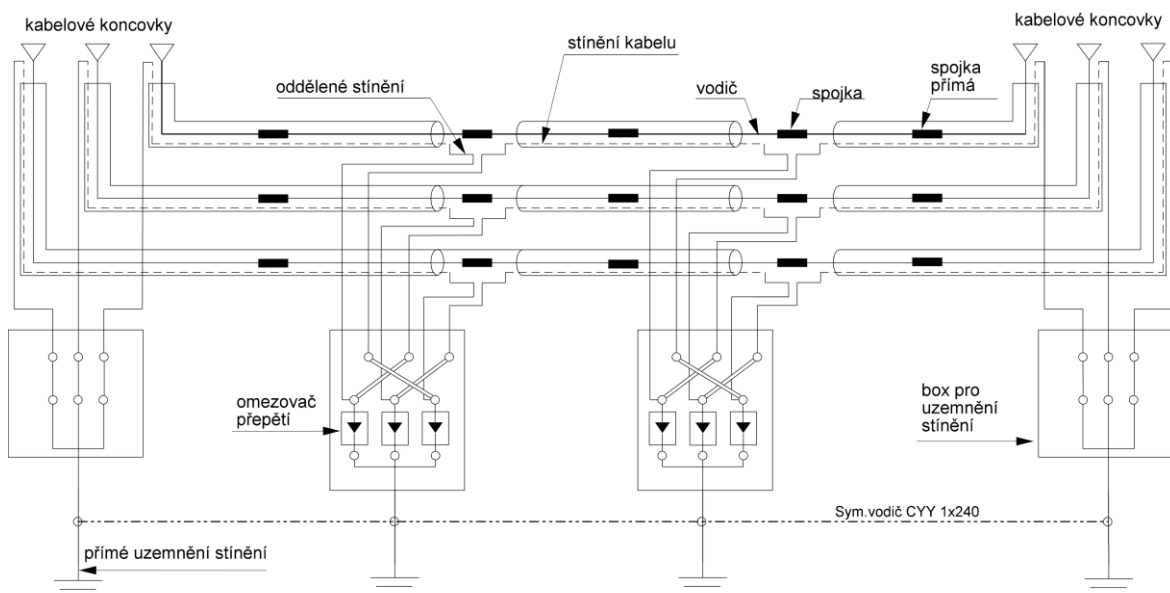
Jako omezující vodič je uvažován kabel typu CYY 1x240 mm².

Tab. 7.3 Parametry omezujícího vodiče

| Materiál | Průměr D (mm) | Poznámky |
|----------|-----------------|---------------------------------------|
| Cu | 17,48 | jádro, průřez $S=240$ mm ² |

Celkové schéma kabelového vedení 110 kV

Způsob zapojení kabelového vedení 110 kV s omezujícím vodičem, v tomto případě tzv. symetizačním vodičem, je zřejmý z následujícího schématu.



Obr. 7.2 Schéma kabelového vedení 1x110 kV

Potrubí

Jako ovlivněné potrubí je uvažováno ocelové izolované potrubí DN 200.

Tab. 7.4 Parametry potrubí

| | |
|-----------------------------|----------------|
| Materiál potrubí | Ocel |
| Průměr potrubí (mm) | 200 |
| Tloušťka stěny potrubí (mm) | 10,0 |
| Materiál izolace potrubí | PE-N třívrstvá |
| Tloušťka izolace (mm) | 2,5 |

Elektrické parametry řešeného systému

Pro analýzu elektromagnetického pole byly uvažovány následující elektrické parametry.

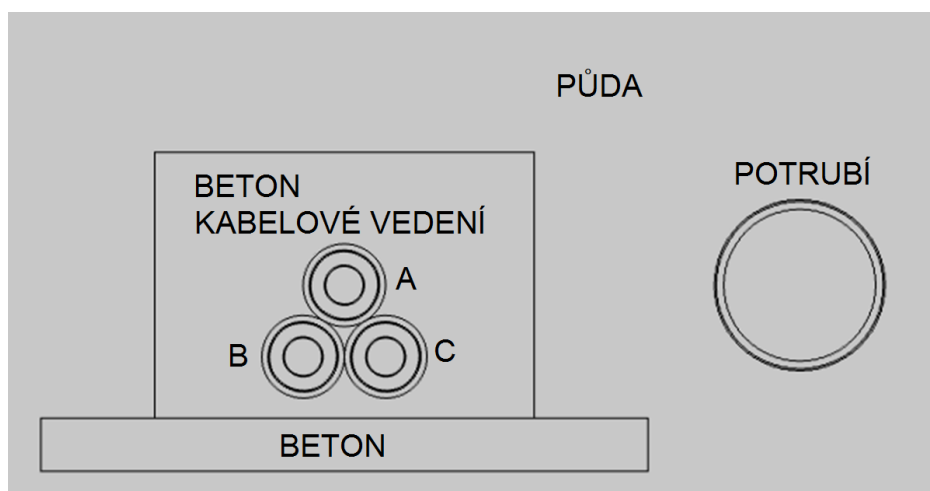
Tab. 7.5 Elektrické parametry dílčích prvků

| Prvek | Elektrická vodivost γ (S/m) | Relativní permitivita ϵ (-) | Relativní permeability μ_r (-) |
|--------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Půda | 0,01 | 1 | 1 |
| Beton | 0,05 | 1 | 1 |
| Vzduch | 0 | 1 | 1 |
| Al | $3,7740 \cdot 10^7$ | 1 | 1 |
| Cu | $5,8108 \cdot 10^7$ | 1 | 1 |
| PE | 10^{-4} | 1000 | 1 |
| Ocel 1 | $4 \cdot 10^6$ | 1 | 4000 |
| Ocel 2 | $4 \cdot 10^6$ | 1 | 200 |
| Izolace pot. | $3,73 \cdot 10^{-8}$ | 2,3 | 1 |

7.2 Analýza vlivu kabelového vedení na potrubí bez ochranných opatření

Byl uvažován jednofázový zkrat na fázi A. S využitím nástroje COMSOL Multiphysics 4.3 byly analyzovány velikosti indukovaných proudů v potrubí v závislosti na jeho vzdálenosti od kabelového vedení. Vzdálenosti byly uvažovány v rozmezí od 0,4 m do 5 m.

Základní upořádání ovlivňujícího kabelového vedení a ovlivněného potrubí je zřejmé z následujícího obrázku.



Obr. 7.3 Základní uspořádání řešené soustavy

Poruchový stav kabelového vedení

Z hlediska nežádoucích induktivních vlivů kabelového vedení na okolní síť je nejnepríznivějším stavem jednofázový zkrat na kabelu. Předpokladem je galvanické spojení porušené fáze se stíněním kabelu a okolním prostředím vlivem porušené izolační vrstvy kabelu. Poruchový proud se rozdělí s ohledem na elektrické odpory jednotlivých prvků, tj. na proud tekoucí fází kabelu A, stíněním kabelu A, betonem a půdou.

Tab. 7.6 Rozdělení proudů a proudových hustot při jednofázovém zkratu

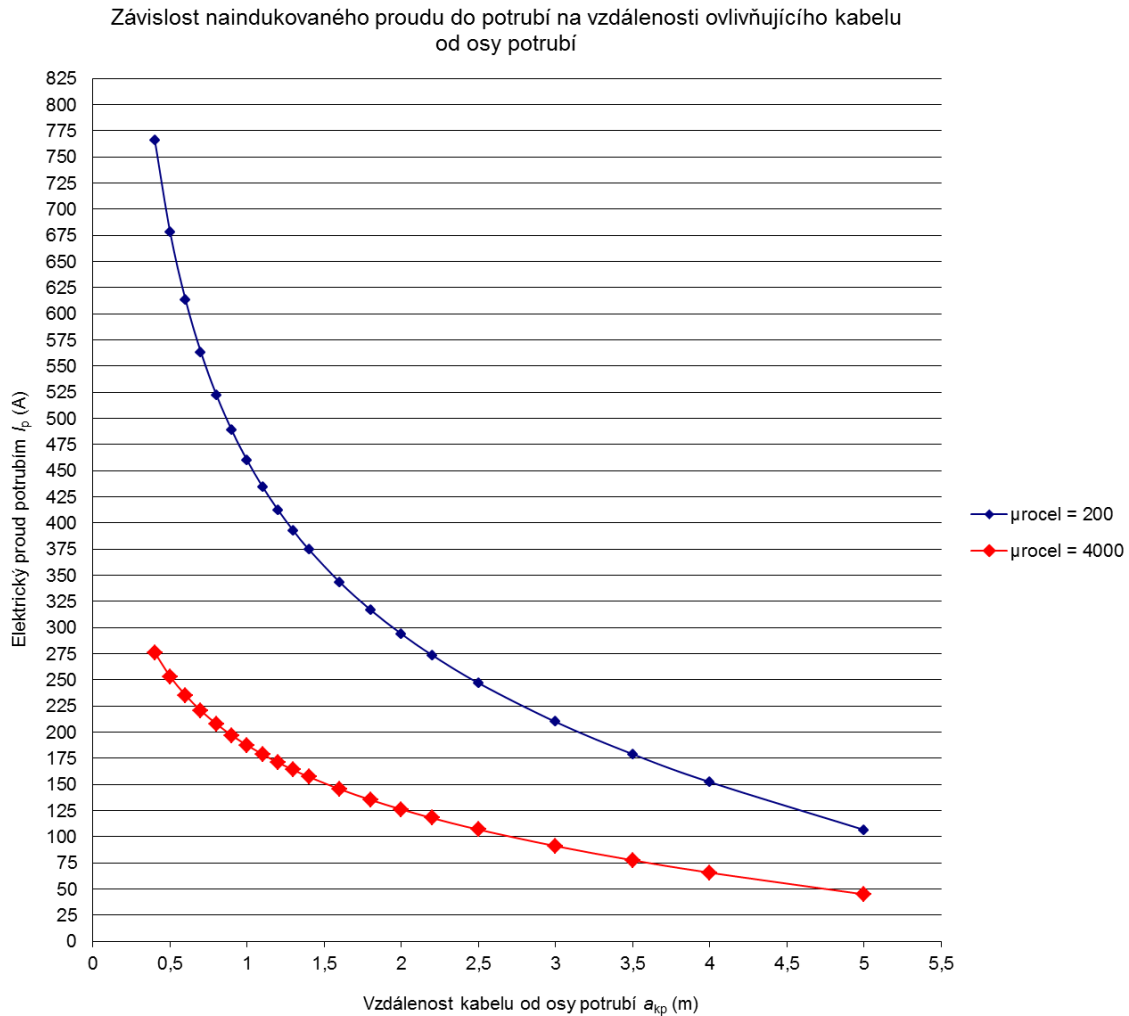
| Vodič | Elektrický proud \bar{I} (A) | Proudová hustota \bar{J} (A/m ²) |
|-----------|--|---|
| Fáze A | $\bar{I}_A = 31850 \angle 0^\circ$ A | $\bar{J}_A = 1,6484 \cdot 10^7$ A/m ² |
| Fáze B | $\bar{I}_B = 500 \angle -120^\circ$ A | $\bar{J}_B = -1,2939 \cdot 10^5 - i \cdot 2,2411 \cdot 10^5$ A/m ² |
| Fáze C | $\bar{I}_C = 500 \angle 120^\circ$ A | $\bar{J}_C = -1,2939 \cdot 10^5 + i \cdot 2,2411 \cdot 10^5$ A/m ² |
| Stínění A | $\bar{I}_{SA} = 31844 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_{SA} = -1,5826 \cdot 10^8$ A/m ² |
| Stínění B | $\bar{I}_{SB} = 0 \angle 0^\circ$ A | $\bar{J}_{SB} = 0$ A/m ² |
| Stínění C | $\bar{I}_{SC} = 0 \angle 0^\circ$ A | $\bar{J}_{SC} = 0$ A/m ² |
| Beton | $\bar{I}_{BK} = 0,0277 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_{BK} = -0,136$ A/m ² |
| Půda | $\bar{I}_P = 6,122 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_P = -0,0272$ A/m ² |

Výpočtem jsem zjistil hodnoty, které jsou uvedeny v následující tabulce 7.7.

Tab. 7.7 Zjištěné hodnoty indukovaného proudu v potrubí

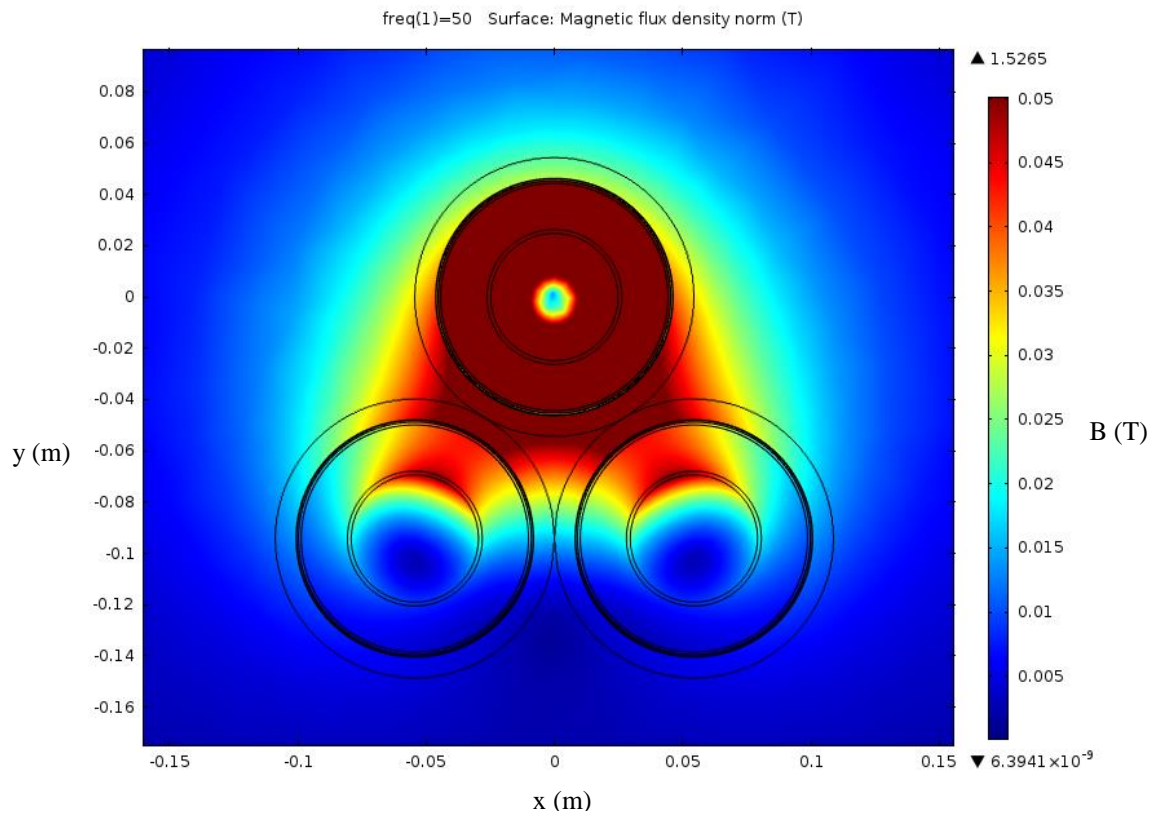
| a_{kp} (m) | Elektrický proud potrubím \overline{I}_{p1} (A), ($\mu_{p1} = 4000$) | | | Elektrický proud potrubím \overline{I}_{p2} (A), ($\mu_{p2} = 200$) | | |
|--------------|---|----------------------------|----------------------------|--|----------------------------|----------------------------|
| | $ \overline{I}_{p1} $ | Re (\overline{I}_{p1}) | Im (\overline{I}_{p1}) | $ \overline{I}_{p2} $ | Re (\overline{I}_{p2}) | Im (\overline{I}_{p2}) |
| 0,4 | 276,220 | 251,228 | 114,814 | 766,202 | 763,429 | -65,118 |
| 0,5 | 253,328 | 232,159 | 101,375 | 677,837 | 673,534 | -76,257 |
| 0,6 | 235,352 | 216,845 | 91,479 | 613,271 | 607,955 | -80,571 |
| 0,7 | 220,487 | 203,987 | 83,686 | 563,151 | 557,181 | -81,783 |
| 0,8 | 207,953 | 192,990 | 77,454 | 522,507 | 516,118 | -81,455 |
| 0,9 | 197,011 | 183,310 | 72,185 | 488,627 | 481,982 | -80,309 |
| 1,0 | 187,440 | 174,755 | 67,782 | 459,701 | 452,912 | -78,712 |
| 1,1 | 178,790 | 166,988 | 63,879 | 434,548 | 427,692 | -76,887 |
| 1,2 | 170,965 | 159,923 | 60,445 | 412,368 | 405,501 | -74,941 |
| 1,3 | 163,872 | 153,476 | 57,438 | 392,532 | 385,696 | -72,941 |
| 1,4 | 157,314 | 147,496 | 54,705 | 374,650 | 367,874 | -70,933 |
| 1,6 | 145,603 | 136,756 | 49,977 | 343,465 | 336,871 | -66,979 |
| 1,8 | 135,308 | 127,267 | 45,949 | 316,962 | 310,602 | -63,177 |
| 2,0 | 126,213 | 118,828 | 42,539 | 293,981 | 287,886 | -59,556 |
| 2,2 | 117,977 | 111,161 | 39,520 | 273,640 | 267,822 | -56,123 |
| 2,5 | 106,931 | 100,835 | 35,587 | 246,988 | 241,601 | -51,303 |
| 3,0 | 91,166 | 86,013 | 30,213 | 209,894 | 205,225 | -44,023 |
| 3,5 | 77,650 | 73,250 | 25,767 | 179,052 | 175,081 | -37,499 |
| 4,0 | 65,769 | 61,982 | 21,996 | 152,364 | 149,061 | -31,555 |
| 5,0 | 45,038 | 42,273 | 15,538 | 106,697 | 104,631 | -20,893 |

Závislost naindukovaného proudu v potrubí na vzdálenosti od ovlivňujícího vodiče je graficky znázorněna na následujícím obrázku 7.4, ve kterém červená křivka přísluší potrubí z oceli o relativní permeabilitě 4000 a modrá křivka potrubí z oceli o relativní permeabilitě 200.

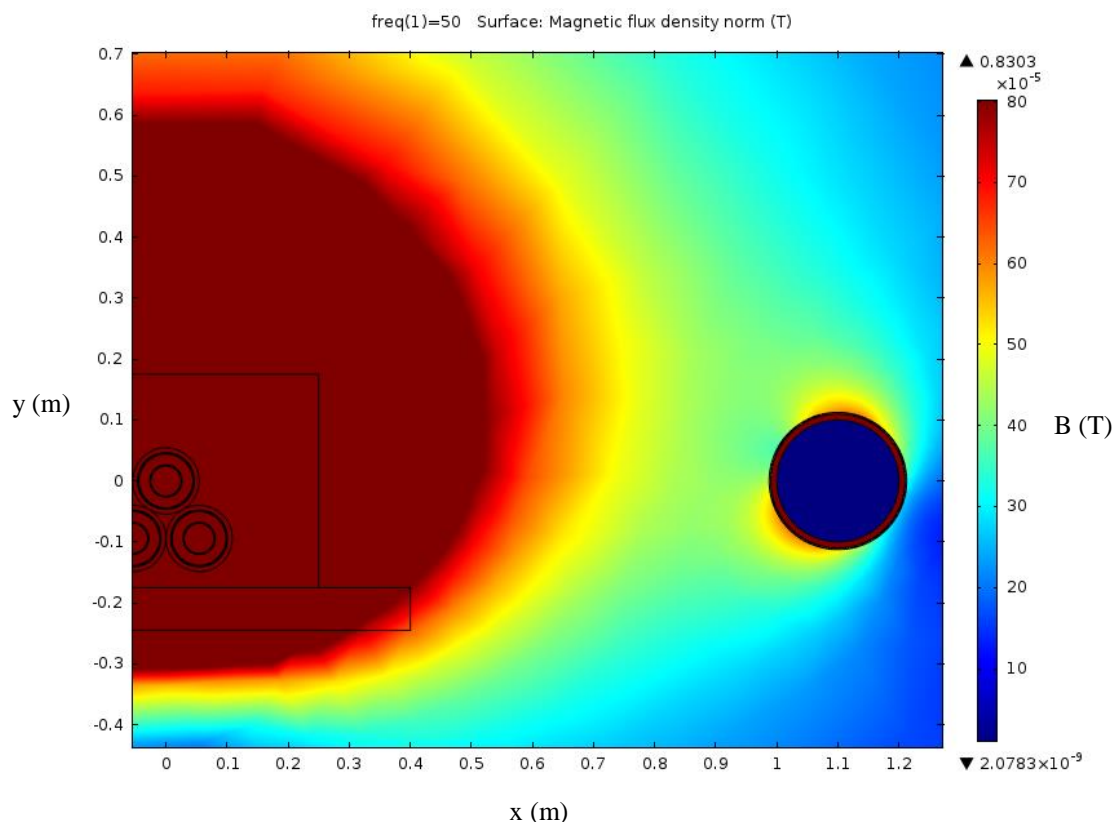


Obr. 7.4 Průběhy velikostí proudů v potrubí v závislosti na vzdálenosti od kabelu

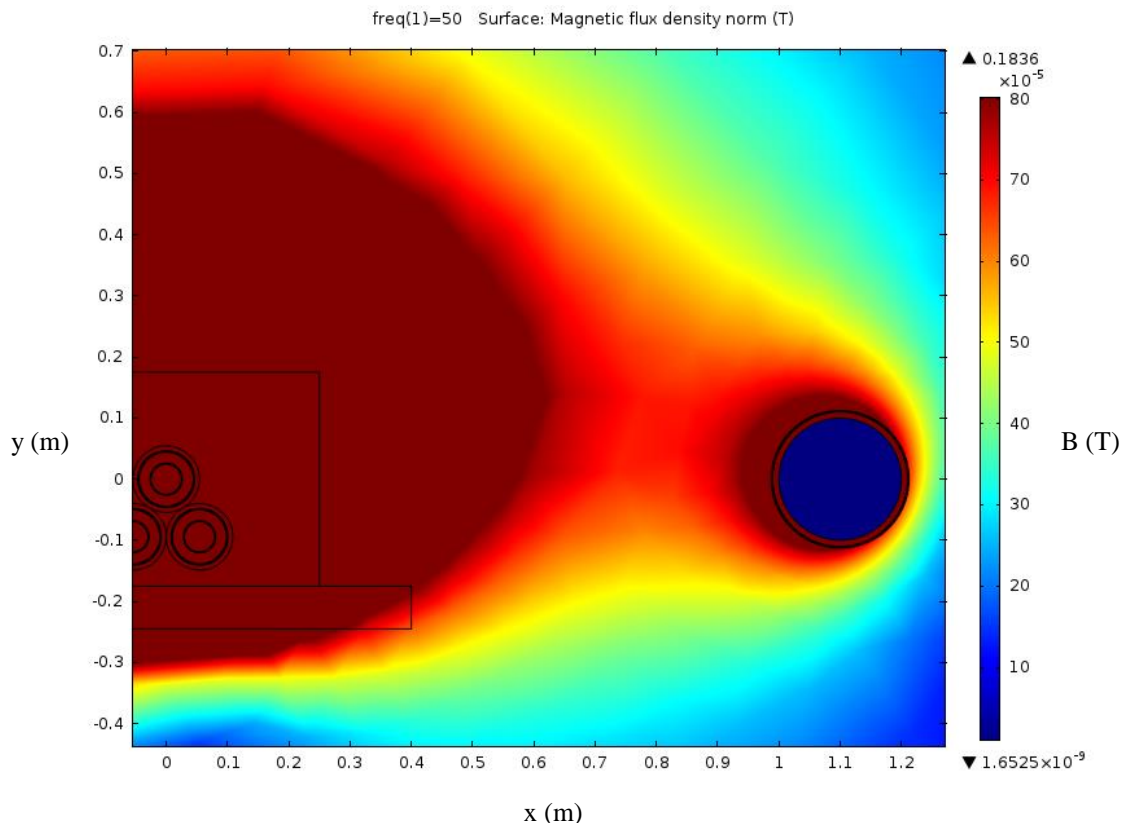
Níže je zobrazeno na obrázku 7.5 rozložení magnetického pole v okolí kabelu s jednofázovou poruchou. Dále jsou pro srovnání uvedena rozložení magnetického pole v okolí ocelových izolovaných potrubí s rozdílnými relativními permeabilitami oceli. Hodnota magnetické indukce je větší u potrubí s nižší relativní permeabilitou oceli. S touto skutečností současně korespondují průběhy na obrázku 7.4.



Obr. 7.5 Rozložení magnetického pole předmětného kabelu



Obr. 7.6 Rozložení magnetického pole pro vzájemnou vzdálenost 1,1 m ($\mu_{rocel}=4000$)



Obr. 7.7 Rozložení magnetického pole pro vzájemnou vzdálenost 1,1 m ($\mu_{rocel}=200$)

7.3 Indukovaná napětí v potrubí od kabelového vedení

Výpočtům podélných indukovaných napětí a potenciálů potrubí předchází stanovení charakteristických parametrů ocelových izolovaných potrubí. Pro jejich výpočet využívám vztahů, jež jsou uvedeny v [37]. Charakteristickými parametry ocelových izolovaných potrubí jsou

- podélná rezistance smyčky potrubí – země respektující skin efekt R ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)

$$R = \left(\frac{\sqrt{\rho_{\text{Fe}} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}}{\pi \cdot D \cdot \sqrt{2}} + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} \right) \cdot 10^3, \quad (7.1)$$

kde:

ρ_{Fe} ($\Omega \cdot \text{m}$) měrná rezistance oceli

μ_0 ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$) permeabilita vakua

μ_r (-) poměrná permeabilita oceli

ω (s⁻¹) kruhová frekvence

D (m) vnější průměr potrubí,

- podélná reaktance X_L ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$) = $\omega \cdot L$

$$X_L = \left(\frac{\mu_0 \cdot \omega}{4 \cdot \pi} \cdot 2 \cdot \ln \frac{3,7 \cdot \sqrt{\rho_z}}{D \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \omega}} + \frac{\sqrt{\rho_{\text{Fe}} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}}{\pi \cdot D \cdot \sqrt{2}} \right) \cdot 10^3, \quad (7.2)$$

kde:

ρ_z ($\Omega \cdot \text{m}$) zdánlivá rezistivita půdy

význam ostatních symbolů, viz (7.1),

- příčná konduktance G ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)

$$G = \pi \cdot D \cdot G_p \cdot 10^{-3}, \quad (7.3)$$

kde:

G_p ($\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-2}$) průměrná vodivost izolace potrubí

- příčná susceptance B_C ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$) = $\omega \cdot C$

$$B_C = \frac{\omega \cdot \pi \cdot D \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\delta} \cdot 10^3, \quad (7.4)$$

kde:

ε_0 ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$) permitivita vakua

ε_r (-) poměrná permitivita izolace potrubí

δ (m) tloušťka izolace potrubí.

Na základě znalostí hodnot ze vztahů (7.1) až (7.4) lze určit velikost součinitele šíření γ (km^{-1}) jako

$$|\bar{\gamma}| = \sqrt[4]{(R^2 + X_L^2) \cdot (G^2 + B_C^2)} \quad (7.5)$$

a jeho fázový úhel φ_γ (rad)

$$\varphi_\gamma = \frac{1}{2} \cdot \left(\arctg \frac{\omega L}{R} + \arctg \frac{\omega C}{G} \right) \quad (7.6)$$

z nichž je možné dále vyčíslit hodnotu délkové konstanty potrubí L_k (km) podle vztahu

$$L_k = \frac{1}{|\bar{\gamma}| \cdot \cos \varphi_\gamma}. \quad (7.7)$$

Dle Ohmova zákona, po zanedbání příčných prvků potrubí, lze určit podélné indukované napětí jako

$$\bar{U}_i = (R + jX_L) \cdot \bar{I}_p. \quad (7.8)$$

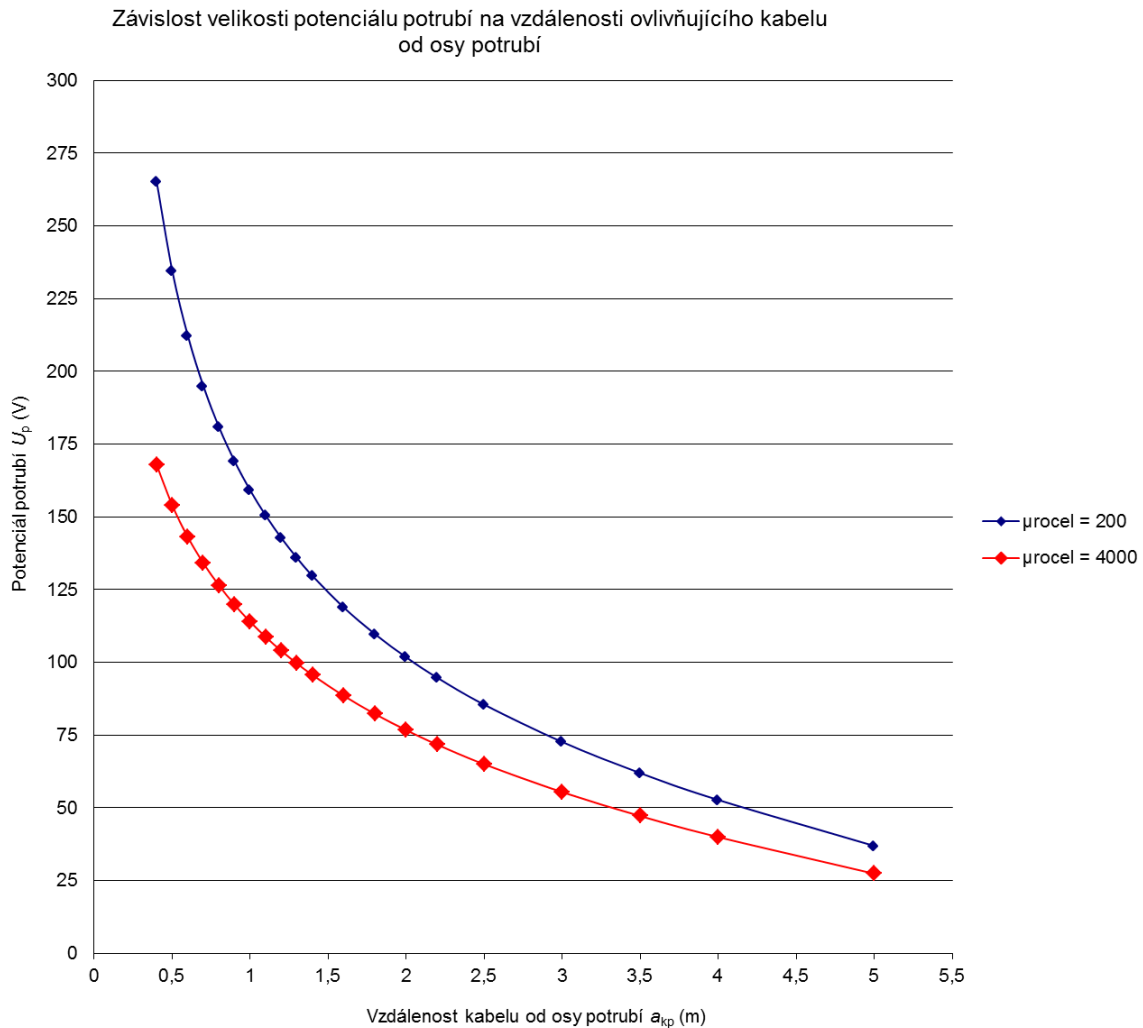
Potenciál potrubí, jehož hodnota se následně porovnává s normativními hodnotami, se určí ze vztahu

$$U_p = \frac{U_i}{2 \cdot |\bar{\gamma}|} \cdot \left(1 - e^{-\bar{\gamma} \cdot l} \right). \quad (7.9)$$

Po dosazení vstupních údajů do výše uvedených vztahů, byly získány výsledné průběhy indukovaných napětí a potenciálů potrubí, jak je patrné z následující tabulky a grafu.

Tab. 7.8 Zjištěné hodnoty indukovaných napětí v potrubí

| a_{kp} (m) | Parametry potrubí: $\mu_{rp1} = 4000$, délka: 1000 m | | | Parametry potrubí: $\mu_{rp2} = 200$, délka: 1000 m | | |
|--------------|--|--------------|--------------|---|--------------|--------------|
| | $\overline{ I_{p1} }$ (A) | U_{i1} (V) | U_{p1} (V) | $\overline{ I_{p2} }$ (A) | U_{i2} (V) | U_{p2} (V) |
| 0,4 | 276,220 | 357,771 | 167,902 | 766,202 | 553,530 | 265,155 |
| 0,5 | 253,328 | 328,120 | 153,987 | 677,837 | 489,693 | 234,575 |
| 0,6 | 235,352 | 304,837 | 143,060 | 613,271 | 443,048 | 212,231 |
| 0,7 | 220,487 | 285,583 | 134,024 | 563,151 | 406,840 | 194,886 |
| 0,8 | 207,953 | 269,348 | 126,405 | 522,507 | 377,477 | 180,821 |
| 0,9 | 197,011 | 255,177 | 119,755 | 488,627 | 353,000 | 169,096 |
| 1,0 | 187,440 | 242,780 | 113,937 | 459,701 | 332,104 | 159,086 |
| 1,1 | 178,790 | 231,575 | 108,678 | 434,548 | 313,932 | 150,381 |
| 1,2 | 170,965 | 221,441 | 103,922 | 412,368 | 297,909 | 142,706 |
| 1,3 | 163,872 | 212,254 | 99,611 | 392,532 | 283,578 | 135,841 |
| 1,4 | 157,314 | 203,760 | 95,625 | 374,650 | 270,660 | 129,653 |
| 1,6 | 145,603 | 188,590 | 88,505 | 343,465 | 248,131 | 118,861 |
| 1,8 | 135,308 | 175,256 | 82,248 | 316,962 | 228,984 | 109,689 |
| 2,0 | 126,213 | 163,476 | 76,719 | 293,981 | 212,382 | 101,736 |
| 2,2 | 117,977 | 152,809 | 71,713 | 273,640 | 197,687 | 94,697 |
| 2,5 | 106,931 | 138,501 | 64,999 | 246,988 | 178,432 | 85,474 |
| 3,0 | 91,166 | 118,081 | 55,416 | 209,894 | 151,634 | 72,637 |
| 3,5 | 77,650 | 100,576 | 47,200 | 179,052 | 129,353 | 61,963 |
| 4,0 | 65,769 | 85,187 | 39,978 | 152,364 | 110,073 | 52,728 |
| 5,0 | 45,038 | 58,336 | 27,377 | 106,697 | 77,082 | 36,924 |



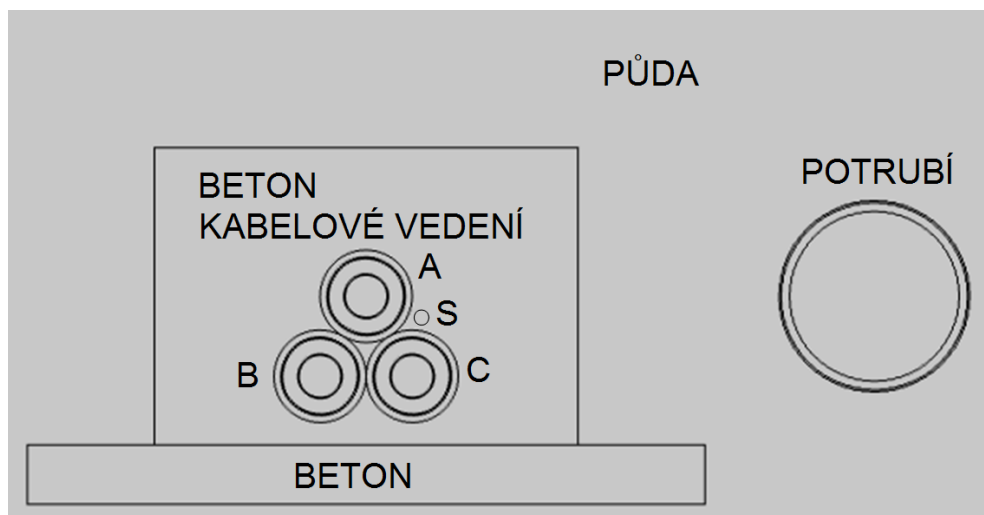
Obr. 7.8 Průběhy velikostí potenciálů potrubí v závislosti na vzdálenosti od kabelu

7.4 Analýza optimálních ochranných opatření

Výpočetní analýzou jsem zjistil, že účinnost omezení elektromagnetického pole omezujícím vodičem je tím větší, čím bude umístěn blíže k ovlivňujícímu vodiči. To vede na realizaci ochranných opatření na straně vedení. Na straně venkovního vedení je přídatná ochrana značně omezena předepsanými limity na prostorové uspořádání vodičů a okolních objektů a s tím související ekonomickou náročností. Z tohoto důvodu se ochranná opatření před vlivy venkovních vedení na potrubí prakticky realizují zejména na straně potrubních systémů. U kabelových vedení jsou prostorové limity a ekonomická náročnost na ochranná opatření výrazně příznivější. Technické a ekonomické podmínky jsou podobné jako u realizace ochranných opatření na straně potrubí. S výhodou lze tedy nežádoucí vlivy kabelových vedení na potrubní systémy efektivně eliminovat aplikací

omezujících vodičů na straně kabelového vedení.

Analyzují míru omezení elektromagnetického pole vlivem omezujícího vodiče, uloženého v bezprostřední blízkosti kabelového vedení, a to pro různé vzdálenosti uložení ocelového izolovaného potrubí.



Obr. 7.9 Uspořádání řešeného systému s omezujícím vodičem S

Je uvažována jednofázová porucha na fázi kabelu A, přičemž poruchový proud, vytékající z místa poruchy, se dělí na proud protékající stíněním kabelu A, omezujícím vodičem S, betonem a půdou. Rozdělení elektrických proudů a proudových hustot bylo provedeno s respektováním elektrických vodivostí jednotlivých prvků. Uvažované hodnoty v řešeném systému s omezujícím vodičem jsou patrné z následující tabulky 7.9.

Provedenými analýzami elektromagnetického pole s využitím výpočetního nástroje COMSOL Multiphysics 4.3 jsem zjistil tzv. redukční koeficienty omezujícího vodiče kabelového vedení 110 kV.

Redukčním koeficientem je v daném případě myšlen poměr výsledného napětí indukovaného v potrubí při uplatnění kompenzačních účinků omezujícího vodiče k napětí, které by se indukovalo v potrubí bez kompenzačního účinku omezujícího vodiče. Eliminující účinek omezujícího vodiče je způsoben deformací okolního elektromagnetického pole. Předmětná deformace je v daném případě zapříčiněna existencí omezujícího vodiče v elektromagnetickém poli a vlastním elektromagnetickým polem, vytvořeném průtokem části zpětného poruchového proudu.

Tab. 7.9 Rozdělení proudů a proudových hustot při jednofázovém zkratu

| Vodič | Elektrický proud \bar{I} (A) | Proudová hustota \bar{J} (A/m ²) |
|-----------|--|---|
| Fáze A | $\bar{I}_A = 31850 \angle 0^\circ$ A | $\bar{J}_A = 1,6484 \cdot 10^7$ A/m ² |
| Fáze B | $\bar{I}_B = 500 \angle -120^\circ$ A | $\bar{J}_B = -1,2939 \cdot 10^5 - i \cdot 2,2411 \cdot 10^5$ A/m ² |
| Fáze C | $\bar{I}_C = 500 \angle 120^\circ$ A | $\bar{J}_C = -1,2939 \cdot 10^5 + i \cdot 2,2411 \cdot 10^5$ A/m ² |
| Vodič S | $\bar{I}_S = 17323 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_S = -7,2184 \cdot 10^7$ A/m ² |
| Stínění A | $\bar{I}_{SA} = 14524 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_{SA} = -7,2184 \cdot 10^7$ A/m ² |
| Stínění B | $\bar{I}_{SB} = 0 \angle 0^\circ$ A | $\bar{J}_{SB} = 0$ A/m ² |
| Stínění C | $\bar{I}_{SC} = 0 \angle 0^\circ$ A | $\bar{J}_{SC} = 0$ A/m ² |
| Beton | $\bar{I}_{BK} = 0,0126 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_{BK} = -0,0621$ A/m ² |
| Půda | $\bar{I}_P = 2,7925 \angle 180^\circ$ A | $\bar{J}_P = -0,0124$ A/m ² |

Provedenými analýzami elektromagnetického pole s využitím výpočetního nástroje COMSOL Multiphysics 4.3 jsem zjistil tzv. redukční koeficienty omezujícího vodiče kabelového vedení 110 kV.

Redukčním koeficientem je v daném případě myšlen poměr výsledného napětí indukovaného v potrubí při uplatnění kompenzačních účinků omezujícího vodiče k napětí, které by se indukovalo v potrubí bez kompenzačního účinku omezujícího vodiče. Eliminující účinek omezujícího vodiče je způsoben deformací okolního elektromagnetického pole. Předmětná deformace je v daném případě zapříčiněna existencí omezujícího vodiče v elektromagnetickém poli a vlastním elektromagnetickým polem, vytvořeném průtokem části zpětného poruchového proudu.

Následkem indukovaných napětí v galvanicky uzavřené smyčce je průtok elektrického proudu. Redukční koeficient omezujícího vodiče lze proto definovat s využitím elektrických proudů jako

$$r_s = \frac{\overline{I_{p2s}}}{\overline{I_{p2}}}, \quad (7.10)$$

kde:

r_s (-) redukční koeficient omezujícího vodiče

$\overline{I_{p2}}$ (A) absolutní hodnota indukovaného proudu v potrubí bez omezujícího vodiče

$\overline{I_{p2s}}$ (A) absolutní hodnota indukovaného proudu v potrubí s omezujícím vodičem

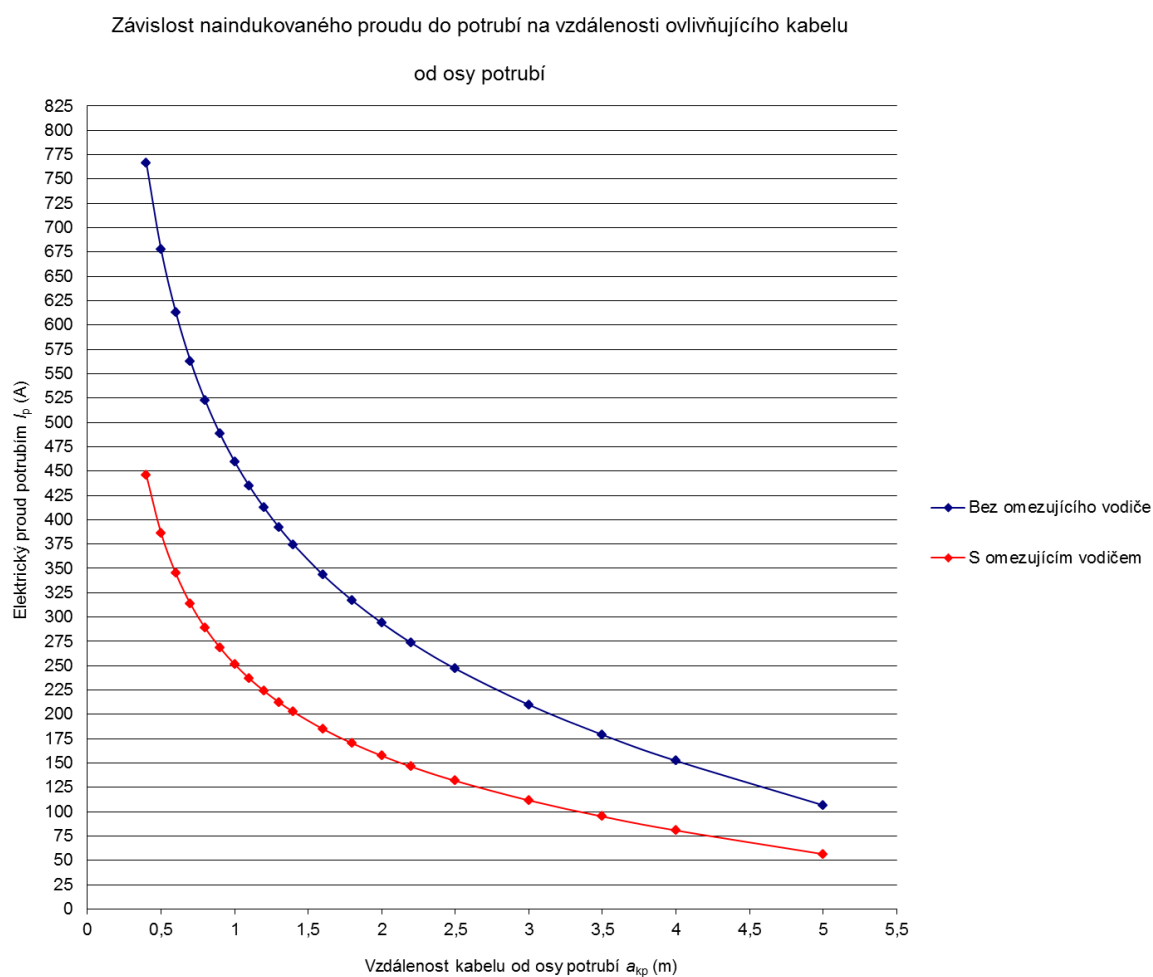
V následující tabulce jsou uvedeny vypočítané hodnoty proudů potrubím, které se do potrubí naindukovali bez omezujícího vodiče a s omezujícím vodičem. Ze získaných proudových poměrů v potrubí jsem určil redukční koeficient omezujícího vodiče kabelového vedení.

Tab. 7.10 Zjištěné hodnoty indukovaného proudu v potrubí a redukčního koeficientu omezujícího vodiče

| a_{kp} (m) | Elektrický proud potrubím bez omezujícího vodiče $\overline{I_{p2}}$ (A), ($\mu_{rp2} = 200$) | | | Elektrický proud potrubím s omezujícím vodičem $\overline{I_{p2s}}$ (A), ($\mu_{rp2} = 200$) | | | r_s (-) |
|--------------|---|----------------------------|----------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| | $ \overline{I_{p2}} $ | Re ($\overline{I_{p2}}$) | Im ($\overline{I_{p2}}$) | $ \overline{I_{p2s}} $ | Re ($\overline{I_{p2s}}$) | Im ($\overline{I_{p2s}}$) | |
| 0,4 | 766,202 | 763,429 | -65,118 | 445,589 | 430,125 | -116,368 | 0,582 |
| 0,5 | 677,837 | 673,534 | -76,257 | 386,394 | 371,757 | -105,340 | 0,570 |
| 0,6 | 613,271 | 607,955 | -80,571 | 344,860 | 331,129 | -96,340 | 0,562 |
| 0,7 | 563,151 | 557,181 | -81,783 | 313,569 | 300,668 | -89,021 | 0,557 |
| 0,8 | 522,507 | 516,118 | -81,455 | 288,812 | 276,639 | -82,963 | 0,553 |
| 0,9 | 488,627 | 481,982 | -80,309 | 268,528 | 256,998 | -77,839 | 0,550 |
| 1,0 | 459,701 | 452,912 | -78,712 | 251,465 | 240,510 | -73,413 | 0,547 |
| 1,1 | 434,548 | 427,692 | -76,887 | 236,813 | 226,374 | -69,533 | 0,545 |
| 1,2 | 412,368 | 405,501 | -74,941 | 224,024 | 214,055 | -66,086 | 0,543 |
| 1,3 | 392,532 | 385,696 | -72,941 | 212,670 | 203,130 | -62,982 | 0,542 |
| 1,4 | 374,650 | 367,874 | -70,933 | 202,517 | 193,371 | -60,172 | 0,541 |

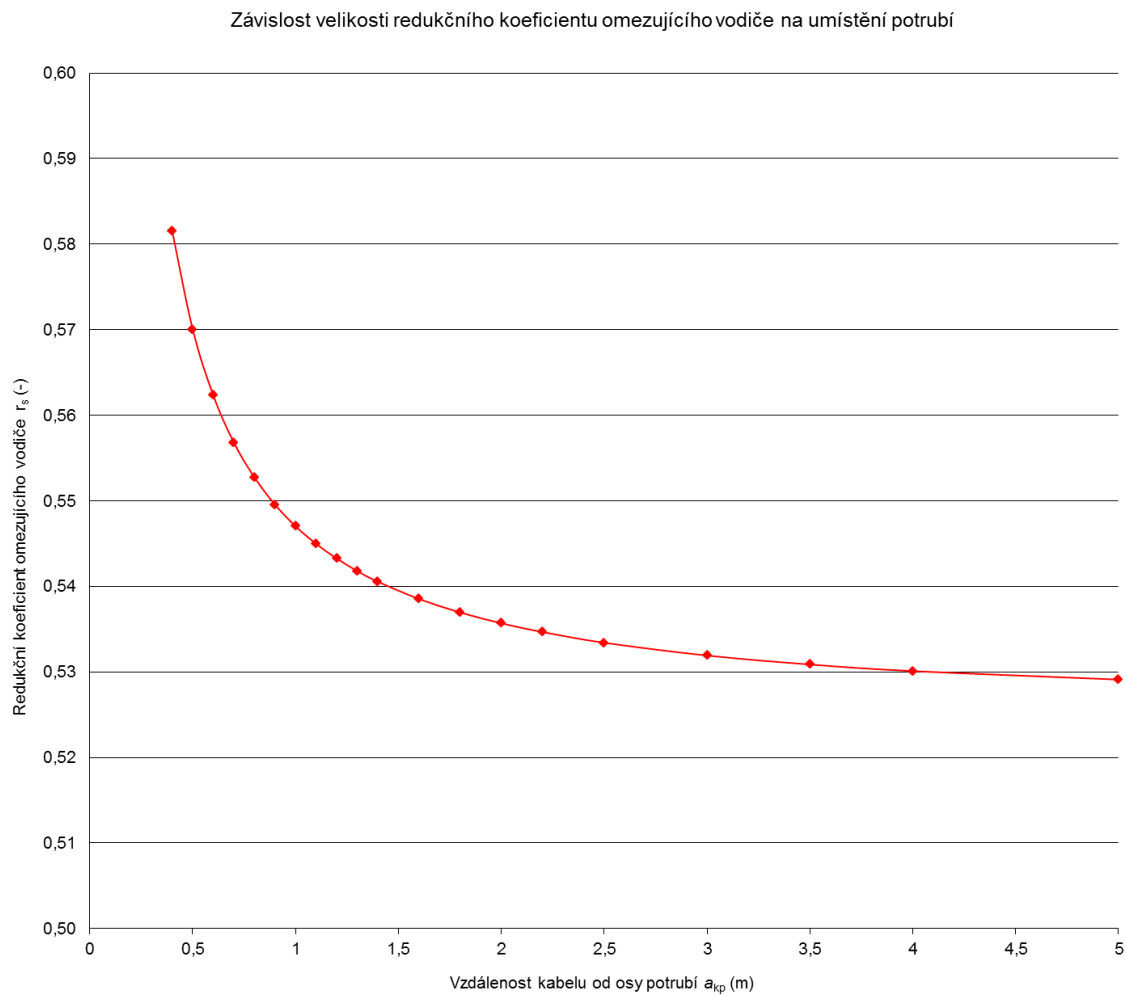
| | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1,6 | 343,465 | 336,871 | -66,979 | 184,965 | 176,526 | -55,231 | 0,539 |
| 1,8 | 316,962 | 310,602 | -63,177 | 170,193 | 162,376 | -50,990 | 0,537 |
| 2,0 | 293,981 | 287,886 | -59,556 | 157,483 | 150,220 | -47,274 | 0,536 |
| 2,2 | 273,640 | 267,822 | -56,123 | 146,307 | 139,546 | -43,961 | 0,535 |
| 2,5 | 246,988 | 241,601 | -51,303 | 131,747 | 125,661 | -39,583 | 0,533 |
| 3,0 | 209,894 | 205,225 | -44,023 | 111,647 | 106,531 | -33,407 | 0,532 |
| 3,5 | 179,052 | 175,081 | -37,499 | 95,054 | 90,774 | -28,199 | 0,531 |
| 4,0 | 152,364 | 149,061 | -31,555 | 80,768 | 77,230 | -23,644 | 0,530 |
| 5,0 | 106,697 | 104,631 | -20,893 | 56,454 | 54,203 | -15,780 | 0,529 |

Grafické znázornění účinku omezujícího vodiče kabelového vedení je patrné z níže uvedeného grafu.



Obr. 7.10 Snížení proudu potrubím aplikací omezujícího vodiče

Velikost redukčního koeficientu omezujícího vodiče kabelového vedení je závislá na vzdálenosti od posuzovaného potrubí. Eliminující účinek je tím větší, čím je menší vzájemná vzdálenost od vyšetřovaného potrubí. S rostoucí vzdáleností hodnota redukčního koeficientu klesá. Projevuje se zde jistá analogie jako u řešení omezujícího účinku zemnicího pásu, který se ukládá v souběhu s potrubím.



Obr.7.11 Závislost redukčního koeficientu na vzdálenosti kabelového vedení od potrubí

8 Závěr

Elektrická venková a kabelová vedení, sloužící k přenosu elektrické energie, představují pro blízká ocelová izolovaná potrubí zdroj potenciálních nežádoucích účinků, jejichž následky je nezbytné predikovat před stavbou potrubí či vedení i během jejich provozování. Správné vyhodnocení nežádoucích účinků by mělo být doplněno o případný návrh opatření, který bude technicky a ekonomicky optimálním řešením. V této disertační práci se zaměřuji na pět klíčových oblastí, které doposud nebyly vědecky řádně prozkoumány. Současná energetická situace si vynucuje jejich podrobná prošetření.

V první oblasti je mou snahou zakomponovat do existujících normativních výpočtů nebezpečných vlivů vvn na potrubí skutečnost deformování elektromagnetického pole v okolí potrubí vlivem souběžných produktovodů. Analyzoval jsem elektromagnetická pole pro různé případy souběhů dvou potrubí a stanovil řadu redukčních koeficientů souběžného, neboli omezujícího, potrubí. Aplikacemi těchto redukčních koeficientů v normativních výpočtech lze získané výsledky více přiblížit reálným hodnotám.

Druhou oblast práce jsem věnoval výzkumu optimálního ochranného opatření na straně potrubního systému. Podrobným rozborem elektromagnetického pole v okolí potrubí se souběžným zemnicím páskem, jsem pro různé dispoziční uspořádání určoval redukční koeficienty zemnicího pásku. Následně jsem sestavil diagram optimálního uložení zemnicího pásku, který lze používat pro jakýkoliv souběh potrubí s venkovním vedením.

Třetí oblast práce jsem věnoval ovlivňování potrubí při provozním stavu vedení. Sestavil jsem postup matematických výpočtů, jehož cílem je stanovit potenciál potrubí, způsobený provozem linek vvn a zvn. Správnost stanoveného výpočtu jsem ověřil praktickým měřením v terénu, kterým byla prokázána vynikající shoda. O tento nově vytvořený výpočet jsem rozšířil výpočetní software, který jsem vytvořil v rámci své diplomové práce. Díky tomu je dnes možné výpočet potenciálu potrubí při provozním stavu vedení vvn a zvn běžně aplikovat při rutinních výpočtech nebezpečných a korozních vlivů.

Jedním z aktuálních témat na půdě plynárenství je komplikace při svařování ocelových

izolovaných potrubí v blízkosti linek vvn a zvn. Zkoumáním podstaty vadných svarů při montáži potrubí v blízkém souběhu s vedením vvn a zvn se věnuji ve čtvrté oblasti této práce. Jelikož se jedná o případy, které nejsou vědecky prozkoumané a zdokumentované, provedl jsem řadu podrobných měření na reálných potrubích, svařených v těsné blízkosti linky 220 kV. Po vyhodnocení výsledků měření jsem učinil závěr, že příčinou chybných svarů nemůže být vliv induktivní ani kapacitní při provozním stavu předmětného vedení. V časových průbězích indukovaných napětí v potrubí jsem však zaznamenal existenci superponovaných pulzů, jejichž výskyt a následky doporučuji k dalšímu zkoumání.

Současný rozvoj kabelových vedení vvn a zvn si vynucuje provedení výzkumu interference na blízká ocelová izolovaná potrubí, kterým jsem se zabýval v páté oblasti této práce. Analyzoval jsem elektromagnetická pole pro poruchový stav kabelového vedení a zkoumal induktivní účinky na blízká v zemi uložená potrubí. Dále jsem provedl podrobný rozbor nápravného opatření na straně ovlivňujícího vedení za účelem eliminace negativních vlivů na okolní objekty. Jednotlivé úlohy jsem řešil pro různé vzdálenosti potrubí od kabelového vedení a pro různé vlastnosti konstrukčního materiálu potrubí. Výsledky jsem graficky zpracoval tak, že poskytují dostatečný podklad pro použití v oblasti přípravy normativního předpisu nebo pro okamžité vyhodnocení konkrétního případu.

8.1 Vlastní přínos

Disertační práce představuje ucelený komplex metodik řešení problematiky vlivů venkovních a kabelových vedení na potrubní systémy s ambicí vytvořit komplexní nástroj pro návrh obou systémů. Za velký přínos své práce považuji vytvoření souboru redukčních koeficientů souběžných ocelových izolovaných potrubí, které lze běžně aplikovat v normativních výpočtech a vypočítané hodnoty tak více konvergovat ke skutečným. Pro oblast realizace ochranných opatření jsem vytvořil numerickou analýzou rozložení elektromagnetického pole diagram optimální polohy uložení zemnicího pásku, který lze využít jako podklad pro projektování efektivního opatření. Odvodil jsem matematické řešení aplikovatelné pro rutinní vyhodnocování korozního a nebezpečného vlivu provozního stavu vedení vvn a zvn na ocelová izolovaná potrubí. O tento výpočet jsem

rozšířil dnes používanou výpočetní aplikaci, kterou jsem vytvořil v rámci diplomové práce. Na základě praktického měření jsem objasnil příčiny komplikací při svařování ocelových trub a poskytl tak dostatek údajů pro další výzkum zaměřený na vliv rušivých pulzů na funkci svařovacích zařízení. Analýzou vlivů kabelových vedení na potrubní systémy jsem položil teoretické základy chování vzájemného ovlivňování kabelových a potrubních systémů a následně vytvořil grafické závislosti klíčových veličin, které lze uplatnit pro tvorbu normativních a vnitropodnikových předpisů, pro vyhodnocení bezpečnosti prakticky připravovaných souběhů a pro další vývoj výpočetních postupů.

8.2 Návrh na další návazné rozvinutí zpracovávaného tématu

Výzkum provedený v předmětné disertační práci se nabízí dále rozvinout ve dvou dílčích problematikách. V problematice svařování potrubí v blízkosti nadzemního vedení vvn a zvn navrhuji podrobněji analyzovat vliv rušivých pulzů na technologii svařování potrubí, verifikovat odolnost systémů svářecích zařízení před rušivými signály korony vedení vvn a zvn, a případně zkoumat varianty ochranných opatření na straně potrubních systémů. V oblasti vlivu kabelových vedení na potrubí navrhuji věnovat se dále vytvořením matematických postupů pro rutinní výpočty nebezpečných a korozních vlivů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Ametani, A. Four-terminal parameter formulation of solving induced voltages and currents on a pipelines system. *Science, Measurement and Technology, IET*. March 2008, vol. 2, no. 2. ISSN 1751-8822.
- [2] Gouda, O. E., Dein, A. Z., El-Gabalawy, M. A.H. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipelines. *Electric Power Systems Research*. October 2013, vol. 103.
- [3] Yuan, H., Qi, L., Wu, Y., Cui, X. Calculation of overvoltage on nearby underground metal pipeline due to the lightning strike on UHV AC transmission line tower. *Electric Power Systems Research*. January 2013, vol. 94.
- [4] Bortels, L., Deconinck, J., Munteanu, C., Topa, V. A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. IEEE, January 2006, vol. 21, no. 1. ISSN 0885-8977.
- [5] Konotop, I., Novitskiy, A., Westermann, D. Constraints on the Use of Local Compensation for the Correction of Neutral Voltage Displacement Caused by the Influence of Nearby Power Lines. In: *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 2014. Rakvere: IEEE, June 2014. ISBN 978-1-4799-5020-1.
- [6] Nasseraddine, M., Rizk, J., Hellany, A., Nagrial, M. Induced Voltage Behavior on Pipelines Due to HV AC Interference under Broken OHEW. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013*. Hobart, TAS: IEEE, October 2013. DOI: 10.1109/AUPEC.2013.6725375.
- [7] Czumbil, L., Micu, D. D., Stet, D., Christoforidis, G. C., Ancas, L. HVPL Conductor Sag Influence on Induced Voltage Evaluation in Nearby Metallic Structures. In: *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2013 48th International Universities. Dublin: IEEE, September 2013. DOI 10.1109/UPEC.2013.6714945.
- [8] Qi, L., Yuan, H., Li, L. Calculation of Interference Voltage on the Nearby Underground Metal Pipeline due to the Grounding Fault on Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, October 2013, vol. 55, no. 5. ISSN 0018-9375.
- [9] Czumbil, L., Stet, D., Micu, D. D., Topa, V., Ancas, L. Stream Gas Pipeline in Proximity of High Voltage Power Lines. Part II – Induced Voltage Evaluation. In: *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2012 47th International Universities. London: IEEE, September 2012. ISBN 978-1-4673-2854-8.
- [10] Ferraris, F., Parvis, M., Angelini, E., Grassini, S. Measuring system for enhanced cathodic corrosion protection. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2012 IEEE International. Graz: IEEE, May 2012. ISBN 978-1-4577-1773-4.

- [11] Zhang, H., Karady, G. G., Hunt, J. Effect of Various Parameters on Inductive Induced Voltage and Current on Pipelines. In: Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. San Diego, CA: IEEE, July 2011. ISBN 978-1-4577-1000-1.
- [12] Muharemovic, A., Zildzo, H., Behlilovic, N., Turkovic, I. Numerical model for calculation of parameters of cathodic protection system with galvanic anodes. In: Information, Communication and Automation Technologies, 2009 ICAT. Bosnia: IEEE, October 2009. ISBN 978-1-4244-4220-1.
- [13] Kopsidas, K., Cotton, I.: Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients. IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, July 2008, vol. 23, no. 3. ISSN 0885-8977.
- [14] Tang, J., Zeng, R., Ma, H., He, J., Zhao, J., Li, X., Wang, Q. Analysis of Electromagnetic Interference on DC Line From Parallel AC Line in Close Proximity. IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, October 2007, vol. 22, no. 4. ISSN 0885-8977.
- [15] Shi, Y., Niu, H., Zhang, Y., Yi, Z., Wang, X., Liu, Y. A New Method for Evaluating Fault Reduction Factor in HV Cable System. In: Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES. Dalian: IEEE, 2005. ISBN 0-7803-9114-4.
- [16] Christoforidis, G. C., Labridis, D. P., Dokopoulos, P. S. Inductive Interference on Pipelines Buried in Multilayer Soil Due to Magnetic Fields From Nearby Faulted Power Lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. IEEE, May 2005, vol. 47, no. 2. ISSN 0018-9375.
- [17] Hossam-Eldin, A. A., Mokhtar, W. Interference Between HV Transmission Line And Nearby Pipelines. In: Power System Conference, MEPCON 2008, 12th International Middle-East. Aswan: IEEE, March 2008. E-ISBN 978-1-4244-1934-0.
- [18] Bo, T., Xishan, W., Zhuohong, P., Wei, Y. Transient Simulation of Conductive Coupling of HV Transmission Line with Underground Pipelines. In: Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific. Wuhan: IEEE, March 2009. E-ISBN 978-1-4244-2487-0.
- [19] Micu, D. D., Ceclan, A., Darabant, L., Stet, D. Analytical and Numerical Development of the Electromagnetic Interference Between a High-Voltage Power Line and a Metallic Underground Pipeline. Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009. Electromotion 2009. 8th International Symposium. Lille: IEEE, July 2009. E-ISBN 978-1-4244-5152-4.
- [20] Janda, Z., Noháč, K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. In: 15th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2014. Brno: VUT Brno, 2014.
- [21] Satsios, K. J., Labridis, D. P., Dokopoulos, P. S. The Influence of Nonhomogeneous Earth on the Inductive Interference Caused to Telecommunication Cables by Nearby AC Electric Traction Lines. In: Harmonics and Quality of Power

Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference. Athens: IEEE, October 1998, vol. 1. ISBN 0-7803-5105-3.

[22] Satsios, K. J., Labridis, D. P., Dokopoulos, P. S. Inductive Interference caused to Telecommunication Cables by Nearby AC Electric Traction Lines. Measurements and FEM Calculations. IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, April 1999, vol. 14, no. 2. ISSN 0885-8977.

[23] Satsios, K. J., Labridis, D. P., Dokopoulos, P. S. The Influence of Nonhomogeneous Earth on the Inductive Interference Caused to Telecommunication Cables by Nearby AC Electric Traction Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, July 2000, vol. 15, no. 3. ISSN 0885-8977.

[24] Dawalibi, F. P., Southey, R. D. Analysis of Electrical Interference From Power Lines to Gas Pipeline, Part I: Computations Methods. In: IEEE Power Engineering Review. New York: IEEE, 1989, vol. 9, no. 7. DOI 10.1109/MPER.1989.4310825.

[25] Dawalibi, F. P., Southey, R. D. Analysis of Electrical Interference From Power Lines to Gas Pipeline, Part II: Parametric Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, January 1990, vol. 5, no. 1. ISSN 0885-8977.

[26] Racasan, A., Muneanu, C., Topa, V., Pop, I. T., Merdan, E. 3D electromagnetic field model for numerical analysis of the electromagnetic interference between overhead power lines and pipelines. In: Electric Power Quality and Utilisation (EPQU), 11th International Conference. Lisbon: IEEE, October 2011. ISSN 2150-6647.

[27] Munteanu, C., Topa, V., Mates, G., Purcar, M., Racasan, A., Pop, I. T. Analysis of the electromagnetic interferences between overhead power lines and buried pipelines. In: Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2012 International Symposium. Rome: IEEE, September 2012. ISSN 2325-0356.

[28] Nassereddine, M., Rizk, J., Hellany, A., Nagrial, M. OHEW types and its implications on pole EPR under pole fault. In: Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference. Melbourne, VIC: IEEE, June 2013. ISBN 978-1-4673-6320-4.

[29] Xie, H., Zhang, G., Zhang, X. Study of electromagnetic impact on buried metallic pipelines due to lightning strike on UHV AC double-circuit tower. Electromagnetic Compatibility (APEMC), Asia-Pacific Symposium. Beijing: IEEE, April 2010. ISBN 978-1-4244-5621-5.

[30] El Dein, A. Z., Wahab, M. A. A., Hamada, M. M., Emmary, T. H. The effects of the Span Configurations and Conductor Sag on the Electric-Field Distribution Under Overhead Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, August 2010, vol. 25, no. 4. ISSN 0885-8977.

[31] Prsa, M. A., Mucalica, N. D., Kasas –Lazetic, K. K. Determination of electromagnetic field in a three-phase system with three single-core power electric cables 110 kV. Eurocon 2009. St.-Petersburg: IEEE, May 2009. E-ISBN 978-1-4244-3861-7.

- [32] Mayer, D. Pohledy do minulosti elektrotechniky. České Budějovice: Nakladatelství KOPP, 2004.
- [33] Mayer, D. Teorie elektromagnetického pole. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [34] Mayer, D. Elektrodynamika v energetice. Praha: Nakladatelství BEN, 2005.
- [35] Benešová, Z., Beran, M., Šroubová, L. Vlivy venkovních vedení velmi vysokého napětí při provozních a poruchových stavech na potrubní systémy. *Plyn*. Praha: Český plynárenský svaz, 2004, **84**(1), 54-56.
- [35] Polák, J., Veleta, P. Rukověť katodické protikorozi ochrany. Praha: Český plynárenský svaz, 2002.
- [36] ČSN 33 2160. Předpisy pro ochranu sdělovacích vedení a zařízení před nebezpečnými vlivy trojfázových vedení vn, vvn a zvn. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [37] ČSN 33 2165. Elektrotechnické předpisy - Zásady pro ochranu ocelových izolovaných potrubí uložených v zemi před nebezpečnými vlivy venkovních trojfázových vedení a stanic vvn a zvn. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [38] ČSN EN 50443. Účinky elektromagnetické interference na potrubí způsobené AC vysokonapěťovými elektrickými trakčními soustavami a/nebo AC vysokonapěťovými napájecími soustavami. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [39] prEN 50443. Effects of Electromagnetic Interference on Pipelines caused by High Voltage A.C. Railway Systems and/or High Voltage A.C. Power Supply Systems. Brussels: CENELEC, 2009.
- [40] AS/NZS 4853:2000. Electrical hazards on metallic pipelines. Wellington: Standards International Ltd, 2000
- [41] Janda, Z. Vyhodnocení vlivu venkovních vedení vvn na blízké plynovody. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [42] Polák, J. Katodická protikorozi ochrana a způsoby snižování koroze bludnými proudy. Praha: Chemoprojekt Praha, 1992.

Seznam publikovaných prací

- [1] Janda, Z., Noháč, K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. In: 15th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2014. Brno: VUT Brno, 2014. ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [2] Janda, Z., Noháč, K. Zkušenosti s výpočetním vyhodnocováním nebezpečného vlivu venkovního vedení vvn na blízká potrubí s využitím specializovaného software. In: 21st International Workshop – Corrosion Protection of Buried Structure. Praha: GAS, s.r.o., 2012, s. 30. ISBN 978-80-7328-277-6.
- [3] Janda, Z., Noháč, K. Nové zkušenosti s výpočetním vyhodnocováním nebezpečného vlivu venkovního vedení vvn na blízké potrubní systémy. In: 22nd International Workshop – Corrosion Protection of Buried Structure. Praha: GAS, s.r.o., 2013. ISBN 978-80-904619-8-7.
- [4] Janda, Z., Veleta, P., Heráň, Š. ČSN 33 2165 – Elektrotechnické předpisy - Zásady pro ochranu ocelových izolovaných potrubí uložených v zemi před nebezpečnými vlivy venkovních trojfázových vedení a stanic vvn a zvn. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [5] Janda, Z., Noháč, K. Nové zkušenosti s výpočetním vyhodnocováním nebezpečného vlivu venkovního vedení vvn na blízké potrubní systémy. Slovgas. Bratislava: Slovenský plynárenský a naftový svaz, 2014, **24**(1), 24-30. ISSN 1335-3853.
- [6] Janda, Z., Noháč, K. Nové zkušenosti s výpočetním vyhodnocováním nebezpečného vlivu venkovního vedení vvn na blízké potrubní systémy. Plyn. Praha: Český plynárenský svaz, 2014, **94**(1), 4-9. ISSN 0032-1761.
- [7] Janda, Z., Noháč, K. Analysis of dangerous inductive influence of HV overhead lines on HP gas pipeline DN 1400 Gazelle. Research report for RWE Plynoprojekt, a.s. Pilsen, 2012.
- [8] Janda, Z., Noháč, K. Výpočet nebezpečných naindukovaných vlivů vedení 110 kV na podzemní vedení společnosti SŽDC, s.o. Výzkumná zpráva pro Energon Dobříš, s.r.o. Plzeň, 2014.
- [9] Janda, Z., Noháč, K. Posouzení vlivů elektromagnetického pole vedení 110 kV na zdraví osob. Výzkumná zpráva pro Energon Dobříš, s.r.o. Plzeň, 2014.
- [10] Janda, Z., Noháč, K.: Výpočet nebezpečných naindukovaných vlivů vedení 400 kV na telekomunikační síť. Výzkumná zpráva pro GA Energo technik, s.r.o. Plzeň, 2013.

- [11] Janda, Z., Noháč, K. Výpočet nebezpečných naindukovaných vlivů vedení 22 kV na plynovod DN 300. Výzkumná zpráva pro Energon Dobříš, s.r.o. Plzeň, 2012.
- [12] Janda, Z., Noháč, K. Studie vzájemného vlivu linky 110 kV a elektrizované železniční trati. Výzkumná zpráva pro Správu železniční dopravní cesty, s.o. Plzeň, 2012.
- [13] Janda, Z., Noháč, K. Výpočet nebezpečných naindukovaných vlivů vedení 110 kV, 220 kV a 400 kV na VTL plynovod DN 300. Výzkumná zpráva pro RWE Plynoprojekt, a.s. Plzeň, 2012.
- [14] Janda, Z., Noháč, K. Výpočet nebezpečných naindukovaných vlivů vedení 110 kV na VTL plynovod DN 300 v blízkosti obce Chlumčany, okres Louny. Výzkumná zpráva pro RWE Plynoprojekt, a.s. Plzeň, 2012.
- [15] Janda, Z., Noháč, K. Posouzení induktivních vlivů vedení V451/448 na blízké potrubní systémy. Výzkumná zpráva pro GA Energo technik s.r.o. Plzeň, 2014.
- [16] Janda, Z., Noháč, K. Posouzení vlivů vvn na síť společnosti RWE GasNet, s.r.o. Výzkumná zpráva pro SAG Elektrovod, a.s. Plzeň, 2014.
- [17] Janda, Z., Veleta, P. Posouzení negativních vlivů VVN a ZVN na plynárenská zařízení z hlediska bezpečnosti provozu PZ. Výzkumná zpráva pro Pražskou plynárenskou a.s. Praha, 2015.
- [18] Janda, Z., Veleta, P. Vlivy VVN a ZVN na plynárenské systémy z hlediska protikorozní ochrany. Výzkumná zpráva pro Pražskou plynárenskou a.s. Praha, 2016.
- [19] Janda, Z. Posouzení vlivů zvn na potrubní systémy pro rozšíření a rekonstrukci rozvodny Prosenice. Výzkumná zpráva pro ČEPS Invest, a.s. Plzeň, 2017.

Přílohy

Příloha A - Průběh okamžitých hodnot provozních proudů na vedení 220 kV

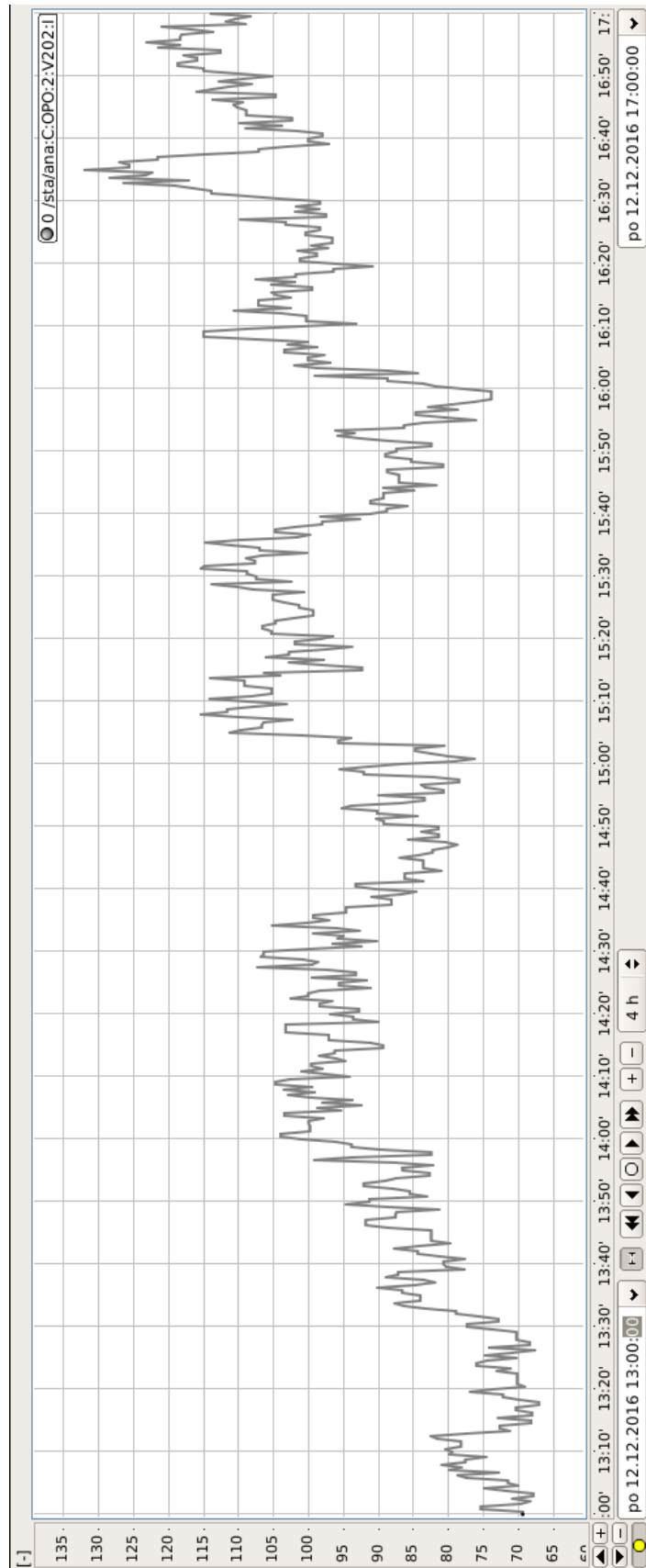
Příloha B - Průběh okamžitých hodnot provozních proudů na vedení V383/386

Příloha C - Měření časových průběhů indukovaných napětí při montáži potrubí

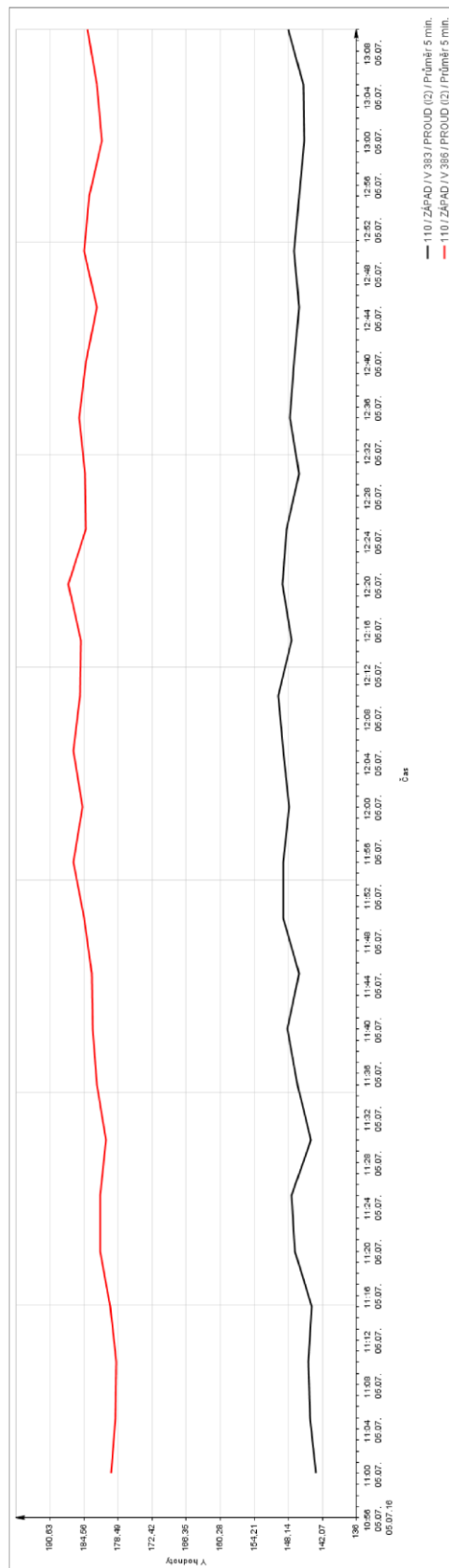
Příloha D - Měření potenciálu potrubí v propojovacím objektu PO4

Příloha E - Rozšíření vyvinutého výpočetního programu

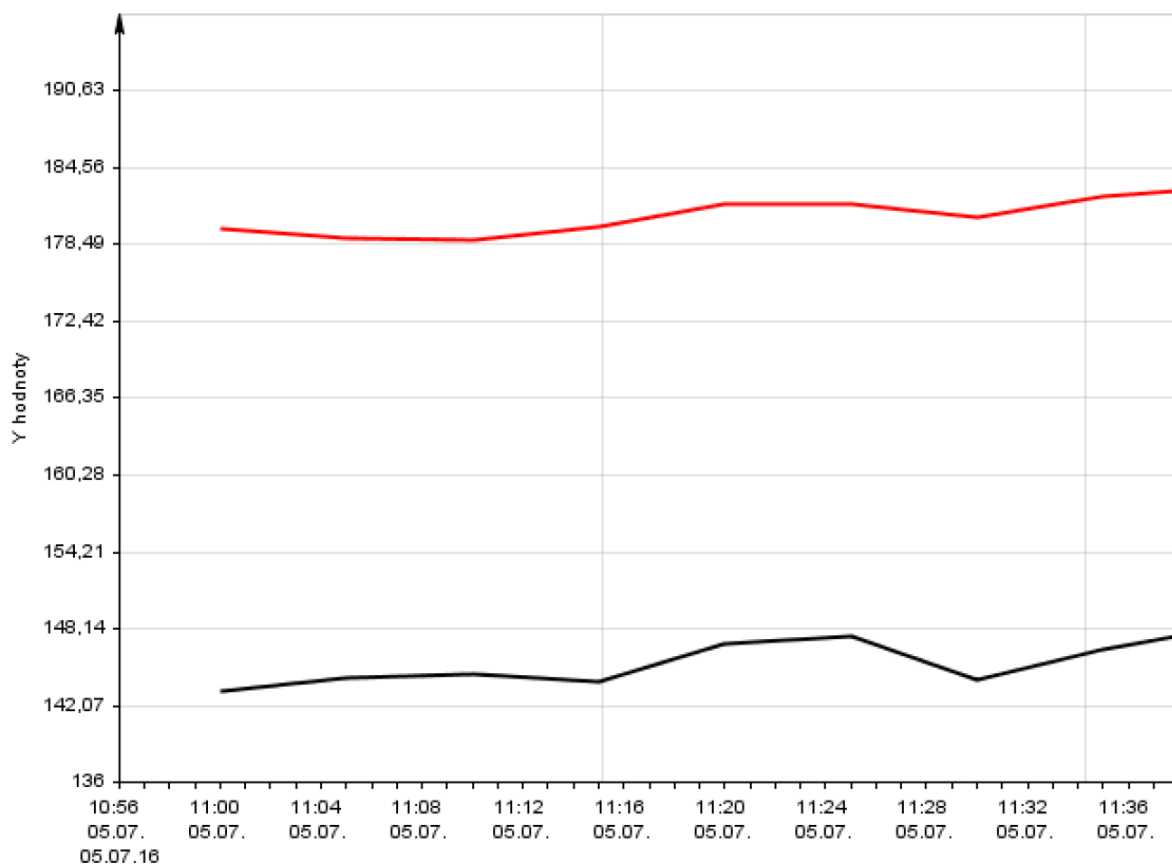
Příloha A - Průběh okamžitých hodnot provozních proudů na vedení 220 kV



Příloha B - Průběh okamžitých hodnot provozních proudů na vedení V383/386



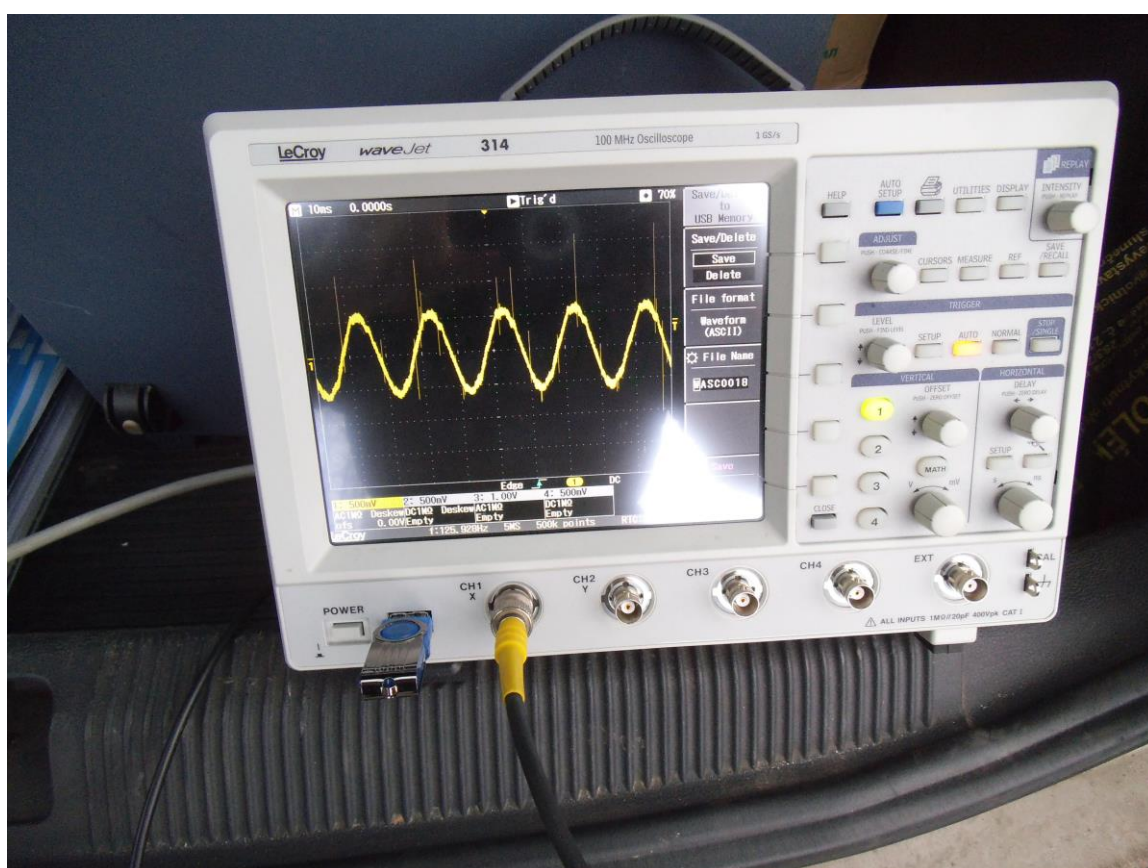
| Pořad. číslo | Viditelný | Jméno Křivka.1 | B1 | B2 | B3 | Elem | Info | Log | Vzorec | X začátek | X konec |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|-----|-------|-------|------------|---------------|--------------------------|--------|---------------------|---------------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | Křivka.1 | 110 | ZÁPAD | V 383 | PROUD (I2) | Průměr 5 min. | <input type="checkbox"/> | | 05.07.2016 10:56:00 | 05.07.2016 13:10:00 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | Křivka.2 | 110 | ZÁPAD | V 386 | PROUD (I2) | Průměr 5 min. | <input type="checkbox"/> | | 05.07.2016 10:56:00 | 05.07.2016 13:10:00 |



Legenda:

| Pořad. číslo | Viditelný | Jméno | B1 | B2 | B3 |
|--------------|-------------------------------------|----------|-----|-------|-------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | Křivka.1 | 110 | ZÁPAD | V 383 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | Křivka.2 | 110 | ZÁPAD | V 386 |

Příloha C - Měření časových průběhů indukovaných napětí při montáži potrubí



Příloha D - Měření potenciálu potrubí v propojovacím objektu PO4



Příloha E - Rozšíření vyvinutého výpočetního programu

Projekt Zobrazit Nápověda Vstupy

Vyhodnocení induktivních vlivů venkovních vedení na blízké plynovody

Počet úseků N [-]: 128 Označení elektrického vedení: V383_386 Zadat a1 [mm], a2 [mm] a L [mm] Měřítko: 1: 10000

Označení plynovodu: 114 Zadat a [m] a L [km] Napětí na vedení U [kV]: 110

| Úsek | Vzdálenost a [m] | Délka úseku l [km] | Proud Ik [kA] | Redukční koef. r [-] | Měrný odpor Ro [ohm.m] | a1 [mm] | a2 [mm] | l [mm] |
|------|------------------|--------------------|---------------|----------------------|------------------------|---------|---------|--------|
| 1 | 547,4 | 0,2171 | 0,778 | 0,601 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 581,6 | 0,0219 | 0,778 | 0,601 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 583,2 | 0,0958 | 0,778 | 0,601 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 515,4 | 0,0794 | 0,778 | 0,601 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 401 | 0,0241 | 0,778 | 0,601 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 641,8 | 0,0842 | 0,778 | 0,601 | 25 | 0 | 0 | 0 |

Posun vodiče

Posun fázového vodiče

Zadejte posun fázového vodiče: v [m]:

| Počáteční úsek | Konečný úsek | A | B | C | Dv | Délka izolace h | e | k | u | d | m | a1 | a2 |
|----------------|--------------|-------|------|---|-----|-----------------|------|-------|------|---|-----|------|--------------------------|
| 1 | 12 | 25,95 | 13,8 | | 0,2 | 3 | 10,8 | 89,41 | 0,95 | | 7,5 | 14,6 | 90,0599139462169 89,6561 |

Typ stožáru SOUDEK Křížení

V11,V13+0 K+0
 V15+0 K+2
 V11,V13+3 K+4
 V15+6 K+6
 U11+0 K+8
 N+10 K+10
 N+12 K+12

Zadat rozměry stožáru ručně

OK Pomocný výpočet

ZL

a6 a3

a5 a2

a4 a1

Posun vodiče

Posun fázového vodiče

Zadejte posun fázového vodiče: v [m]:

| Počáteční úsek | Konečný úsek | A | B | C | D | Délka izolace h | e | k | u | d | m | a1 |
|----------------|--------------|----|------|------|-------|-----------------|---|---|-----|----|---|----|
| | | 46 | 27,9 | 23,6 | 6,975 | 5 | | 7 | 3,8 | 15 | | |

Typ stožáru DONAU Křížení

N+0 K+0
 N+2 K+2
 N+4 K+4
 N+6 K+6
 N+8 K+8
 N+10 K+10
 N+12 K+12

Zadat rozměry stožáru ručně

OK Pomocný výpočet

ZL2 ZL1

a5 a2

a4 a6 a1 a3