

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Vliv drážní dopravy na inženýrské sítě

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zbyněk Vondrášek, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Tomáš Martinek

PRAHA 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Martinek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Vliv drážní dopravy na inženýrské sítě

Název anglicky

The impact of rail transport on utility networks

Cíle práce

- 1) Úvod
- 2) Popis vlivů elektrického napájení drah na okolí
- 3) Specifika vlivu napájení drah na inženýrské sítě
- 4) Zpracování měření konkrétního případu
- 5) Závěr

Metodika

Studie interakcí mezi dráhami se závislou elektrickou trakcí a inženýrskými sítěmi a zabezpečovací technikou v jejím okolí. Zpracování podkladů pro konkrétní případ s doporučením pro řešení možných nepříznivých vlivů.

Doporučený rozsah práce

40 – 55 s.

Klíčová slova

elektrická trakce, elektrolytická koroze, elektromagnetická kompatibilita, zabezpečení

Doporučené zdroje informací

Horák K., Paleček J., Pokorný M./ Napájení elektrizovaných železnic; Praha: Nakladatelství dopravy a spojů 1989, ISBN 80-7030-030-2

Kostadinov D., Škarda D./ Výpočet rušivých nebezpečných vlivů střídavé trakce na sdělovací vedení; Praha: NADAS 1967

Kroutl F./ Teorie sdělování 4 – Sdělovací vedení pod účinkem cizích napětí a proudů; Praha: VŠ dopravní a SNTL 1961.

Kůs V./ Nízkofrekvenční rušení; Plzeň: ZČU 2003, ISBN 80-7082-976-1

Mörbe K., et al./Praktischer Korrosionsschutz; Wien/New York: Springer Verlag 1987, ISBN 3-211-81980-0/0-387-81980-0 (německy)

Parra I. K./ Avtomatičeskaja stancia katodnoj zaščity podzemnych metalličeskich truboprovodov ot korrozii; Kijev: AN SSSR 1963, 49 s. (rusky)

Striževskij I. V., Levin V. M., Tarniževskij M. V. / Metody bor'by s elektrokorroziej gorodskich truboprovodov; Moskva: 1968 Izdatelstvo literatury po strojitelstvu, 146 s. (rusky)

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Zbyněk Vondrášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2018

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 05. 02. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv drážní dopravy na inženýrské sítě vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že se na moji diplomovou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne:

Podpis: _____

Bc. Tomáš Martinek

Poděkování

Poděkování patří Ing. Zbyňku Vondráškovi, Ph.D., konzultantům Ing. Bc. Milanu Zedníkovi a Ing. Petru Steinerovi za vedení, ochotu, odborné konzultace a připomínky během psaní této práce. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za podporu v průběhu celého svého studia.

Abstrakt

Diplomová práce na téma „Vliv drážní dopravy na inženýrské sítě“ popisuje energetickou kompatibilitu elektrizovaných železničních drah a inženýrských sítí, zastoupených zemními kabely sloužících pro účely funkce zabezpečovacích nebo sdělovacích zařízení. V práci je uveden popis nebezpečných a rušivých vlivů vznikajících havarijnými stavy střídavé elektrické soustavy a jejich působení na inženýrské sítě. Práce obsahuje výpočet indukovaných napětí do kabelů zabezpečovacího zařízení a následné doporučení pro eliminaci těchto indukovaných napětí.

Abstract

The diploma thesis "The influence of rail transport on engineering networks" is focused on energy compatibility of electrified railways and engineering networks represented by soil cables serving for security device purposes or communication technologies. The thesis describes dangerous and disturbing influences occurring by serious disrepairs of alternating electrical system as well as its influences on engineering network. The work includes the calculation of induced voltage within security equipment cables and subsequently recommends the elimination of given induced voltage.

Klíčová slova

Elektrická trakce, elektrolytická koroze, elektromagnetická kompatibilita, zabezpečení.

Key words

Electric traction, electrolytic corrosion, electromagnetic compatibility, security.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍLE PRÁCE	2
3	METODIKA.....	3
4	LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	4
4.1	ELEKTRICKÁ TRAKCE.....	4
4.1.1	<i>Elektrická vozba</i>	<i>4</i>
4.1.2	<i>Vozidla s elektrickou trakcí závislou.....</i>	<i>5</i>
4.1.3	<i>Vozidla s elektrickou trakcí nezávislou</i>	<i>5</i>
4.1.4	<i>Význam elektrické vozby na železnicích pro dopravu</i>	<i>6</i>
4.2	ELEKTRIZACE DRAH V ČR A EVROPĚ.....	7
4.3	NAPÁJENÍ ELEKTRIZOVANÝCH DRAH	9
4.3.1	<i>Přívod proudu</i>	<i>9</i>
4.3.2	<i>Napájení trakční sítě</i>	<i>9</i>
4.3.3	<i>Stejnoseměrná soustava (DC) 1,5 kV.....</i>	<i>12</i>
4.3.4	<i>Stejnoseměrná soustava (DC) 3 kV.....</i>	<i>12</i>
4.3.5	<i>Střídavá soustava sníženého kmitočtu (AC) 15 kV; 16,7 Hz.....</i>	<i>13</i>
4.3.6	<i>Střídavá soustava (AC) 25 kV, 50 Hz.....</i>	<i>13</i>
4.4	POPIS VLIVŮ ELEKTRICKÉHO NAPÁJENÍ DRAH NA INŽENÝRSKÉ SÍTĚ.....	14
4.4.1	<i>Základní pojmy.....</i>	<i>14</i>
4.5	STAVY TROLEJOVÉHO VEDENÍ.....	19
4.6	PŮSOBENÍ RUŠIVÝCH A NEBEZPEČNÝCH VLIVŮ NA VEDENÍ	21
4.7	ZÁKLADNÍ TEORIE NEBEZPEČNÝCH A RUŠIVÝCH VLIVŮ	22
4.7.1	<i>Elektromagnetické vlivy</i>	<i>22</i>
4.7.2	<i>Elektrostatické vlivy</i>	<i>23</i>
4.8	VZÁJEMNÉ VLIVY ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	24
4.8.1	<i>Přímé působení.....</i>	<i>24</i>
4.8.2	<i>Nepřímé působení.....</i>	<i>25</i>
4.8.3	<i>Kapacitní vlivy.....</i>	<i>25</i>
4.8.4	<i>Indukční vlivy</i>	<i>25</i>
4.8.5	<i>Galvanické vlivy.....</i>	<i>26</i>
4.9	ZKRATY NA VEDENÍCH STŘÍDAVÉ TRAKCE	26

4.10	MĚŘÍCÍ METODY V OBORU RUŠIVÝCH A NEBEZPEČNÝCH VLIVŮ	28
4.10.1	<i>Měření prováděna na projektovaných tratích</i>	28
4.10.2	<i>Měření prováděna při ovlivnění dosavadními vedeními</i>	28
4.10.3	<i>Kontrolní měření</i>	28
4.10.4	<i>Jednorázová měření.....</i>	29
4.10.5	<i>Měření indukovaných napětí vlivem trakčního vedení</i>	29
4.11	OCHRANNÁ OPATŘENÍ PROTI VLIVŮM	29
4.11.1	<i>Opatření proti rušivým vlivům.....</i>	32
4.11.2	<i>Opatření proti nebezpečným vlivům</i>	32
4.11.3	<i>Opatření na sdělovacích nebo zabezpečovacích vedeních.....</i>	33
4.11.4	<i>Zvláštní ochrany.....</i>	33
5	PRAKTICKÁ ČÁST	34
5.1	SPECIFIKACE VLIVU NAPÁJENÍ DRAH NA INŽENÝRSKÉ SÍTĚ	34
5.1.1	<i>Základní údaje.....</i>	34
5.2	POSTUP VÝPOČTU	37
5.3	VZOROVÝ VÝPOČET	43
5.3.1	<i>Základní údaje.....</i>	43
5.3.2	<i>Parametry výpočtu</i>	44
5.4	PRVNÍ VARIANTA VÝPOČTU STÁVAJÍCÍHO KABELU NA NEELEKTRIZOVANÉ TRATI.....	44
5.5	PRVNÍ VARIANTA VÝPOČTU NAVRHOVANÉHO KABELU NA NEELEKTRIZOVANÉ TRATI	50
5.6	DRUHÁ VARIANTA VÝPOČTU STÁVAJÍCÍHO KABELU NA ELEKTRIZOVANÉ TRATI	52
5.7	DRUHÁ VARIANTA VÝPOČTU NAVRHOVANÉHO KABELU NA ELEKTRIZOVANÉ TRATI...	54
5.8	VÝSLEDKY A DISKUZE	55
6	ZÁVĚR.....	60
	POUŽITÁ LITERATURA	61
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM TABULEK	66
	SEZNAM GRAFŮ	66
	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	67

PŘÍLOHA Č. 1: GRAF PRO URČENÍ VZÁJEMNÉ INDUKČNOSTI M DLE ČSN 33 2140	68
PŘÍLOHA Č. 2: TABULKA MEZÍ NEBEZPEČNÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH VLIVŮ DLE ČSN 33 2140	69
PŘÍLOHA Č. 3: TABULKA REDUKČNÍHO Činitele KOLEJÍ DLE ČSN 33 2140	70
PŘÍLOHA Č. 4: TABULKA INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ ZABEZPEČOVACÍHO VEDENÍ NEELEKTRIZOVANÉ TRATI.....	71
PŘÍLOHA Č. 5: TABULKA INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ ZABEZPEČOVACÍHO KABELU ELEKTRIZOVANÉ TRATI	72

1 ÚVOD

Posuzování kompatibility elektrické trakční sítě a inženýrských sítí patří k nedílné součásti projektování železniční dopravní infrastruktury. Důvodem je výhledový stav jednotné napájecí soustavy 25 kV, 50 Hz. Výsledné posouzení výsledků nebezpečných i rušivých vlivů působících na zabezpečovací nebo sdělovací vedení ovlivňuje bezpečný provoz zabezpečovacích a sdělovacích zařízení a tím i celý provoz na železnicích.

Teoretická část diplomové práce je rozdělena na dvě části, kde první část obsahuje vývoj elektrizace drah na českém území a její vazby na elektrická vozidla. V této části jsou také popsány energetické prvky, které tvoří trakční síť a umožňují její plynulý a bezpečný provoz.

Druhou částí práce je popis vzniku a působení nebezpečných a rušivých vlivů na inženýrské sítě, které jsou zastoupeny zabezpečovacími a sdělovacími kabely. Tato část obsahuje možnosti zjištění, měření a následná opatření proti nebezpečným a rušivým vlivům.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na výpočet nebezpečných vlivů, působících na konkrétní traťový úsek, složený ze dvou možností souběhu zabezpečovacích kabelů s elektrizovaným traťovým úsekem a následná doporučená opatření.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je seznámení s problematikou působení střídavé závislé elektrické trakce v drážní dopravě na inženýrské sítě, které jsou zastoupeny v podobě zabezpečovacích a sdělovacích zařízení.

3 METODIKA

Studie popisující interakci mezi drahami se závislou elektrickou trakcí a inženýrskými sítěmi a zabezpečovací technikou v jejím okolí. Zpracování podkladů pro konkrétní případ s doporučením pro řešení možných nepříznivých vlivů.

4 LITERÁRNÍ REŠERŠE

Tato kapitola popisuje prvky drážní dopravy, kvůli nimž dochází ke vzniku nebezpečných a rušivých vlivů, které negativně působí na inženýrské sítě.

4.1 Elektrická trakce

Pod pojmem „elektrická trakce“, kde “trakce“ je slovo latinského původu používané i ve světových jazycích (the electrical traction, le traction électrique, die elektrische Traktion) rozumíme pohon kolejových hnacích kol i elektromotorů používaných u silničních vozidel. Jako prvotním zdrojem energie k pohonu vozidla přitom nemusí být pouze elektrická energie. Příkladem mohou být dieselelektrická vozidla, u kterých je prvotním zdrojem energie motorová nafta, zdrojem mechanického výkonu je vznětový motor. [1] [18]

4.1.1 Elektrická vozba

Pojem “elektrická vozba“ nám říká, že prvotním zdrojem energie, kterou dodáváme vozidlu, je energie elektrická. Tato energie může být dodávána z trakčního vedení nebo z akumulátorové baterie. Elektrická vozba je mechanizovaná pozemní doprava, jež používá k pohonu elektrickou energii přiváděnou ke dráze. [1]

Elektrickou vozbu lze rozdělit podle:

- proudové soustavy – střídavé sníženého kmitočtu 25 a 16 2/3 Hz, stejnosměrné, nebo průmyslového kmitočtu 50 či 60 Hz
- jízdní dráhy – silniční, kolejové, zvláštní (lanové, visuté, vedené po vzdušném polštáři, magnetickou levitací apod.)
- druhu dopravy – důlní, průmyslové, železniční, městské hromadné dopravy. [2]

Druhy vozby, trakce a vozidel

Vozba	Trakce	Vozidlo
Parní	parní	parní
Motorová (dieslová)	mechanický přenos	dieselmechanické
Motorová (dieslová)	hydraulický přenos	dieselhydraulické
Motorová (dieslová)	elektrický přenos	dieselektrické
Turbinová	elektrická	turboelektrická
Elektrická	elektrická	elektrické
El. akumulátorová	elektrická	el. akumulátorové
Motorová + akumul.	elektrická	hybridní
Setrvačnicková	elektrická	gyroelektrické

Tabulka 1 - Druhy vozby, trakce a vozidel [1]

Z praxe je známo, že i jiné druhy dopravních prostředků pohánějí elektromotory, např. některá plavidla (výletní čluny), lanovky. U těchto dopravních prostředků se však nejedná o elektrickou trakci, protože nemají hnací kola, tudíž jejich pohon je neadhezní. [1]

Dle tabulky 1 je patrné, že vozidla s elektrickou trakcí můžeme dále rozdělit na vozidla s elektrickou trakcí závislou a nezávislou. [1]

4.1.2 Vozidla s elektrickou trakcí závislou

Jedná se o elektrická hnací vozidla (zkratka EHV), která konají rozhodující část dopravní práce v městské i železniční dopravě a jsou závislá na napájení z trakčního vedení (vozidla elektrická).

- hlavní železniční tratě → elektrické lokomotivy a elektrické motorové vozy (EMV),
- hlubinné doly → důlní (báňské) lokomotivy,
- povrchové doly → elektrické odklízečí lokomotivy,
- podzemní dráhy, příměstské rychlodráhy → EMV,
- městské pouliční dráhy (tramvaje), trolejbusy → EMV.

4.1.3 Vozidla s elektrickou trakcí nezávislou

Jsou to vozidla nezávislá na napájení z vnějšku, protože jejich elektrická energie je vyráběna nebo akumulována přímo ve vozidle (diesel a turboelektrická vozidla, el. akumulátorová, hybridní, gyroelektrická). [1]

4.1.4 Význam elektrické vozby na železnicích pro dopravu

Nejvýkonnějším druhem pozemní dopravy je elektrická vozba s vozidly kolejovými, které jsou závislé na napájení z trakčního vedení. Tento druh dopravy ke svému provozu potřebuje:

- a) Elektrická hnací vozidla
- b) Rozvod energie vedením velmi vysokého napětí (VVN), dodávaného z elektráren k trakčním napájecím stanicím (TNS).
- c) Zdroje elektrické energie – elektrárny (vodní, jaderné, tepelné).
- d) Rozvod trakčního proudu trakčním vedením – vrchním trolejovým vedením a zpětnými kolejniciemi po trati.
- e) Trakční napájecí stanice – transformovny, měnírny, spínací stanice.

Nevýhody závislé vozby:

V porovnání s elektrickou vozbou nezávislou, kde body b) – d) neexistují, je tedy elektrická závislá vozba investičně náročná. Nevýhoda také spočívá v závislosti na trakčním vedení, které je zranitelné v případě nehody, nebo válečného konfliktu. [1]

Výhody závislé vozby:

Z hlediska dopravního elektrická vozba umožňuje:

- zvýšení rychlosti vlaků na 200–250 km/h a v budoucnosti na 300–400 km/h. V zahraničí jsou v současnosti rychlosti nad 300 km/h běžně používány,
- stavba hnacích vozidel s nejvyšším adhezně využitelným výkonem,
- vyšší využití hnacích vozidel,
- provoz je ekologický,
- zvýšení hmotnosti vlaků i na horských tratích.

Vlastnosti trakčního motoru

- snadná možnost regulace výkonu TM,
- dynamicky vyvážený chod,
- pro trakci vhodným tvarem charakteristiky $n = f(M)$,
- možnost výkonového i proudového přetížení TM až na dvojnásobek jmenovitého proudu po omezenou dobu (např. při elektrodynamickém brždění nebo rozjezdu),

- snadnou údržbou a obsluhou.

Energetické hledisko

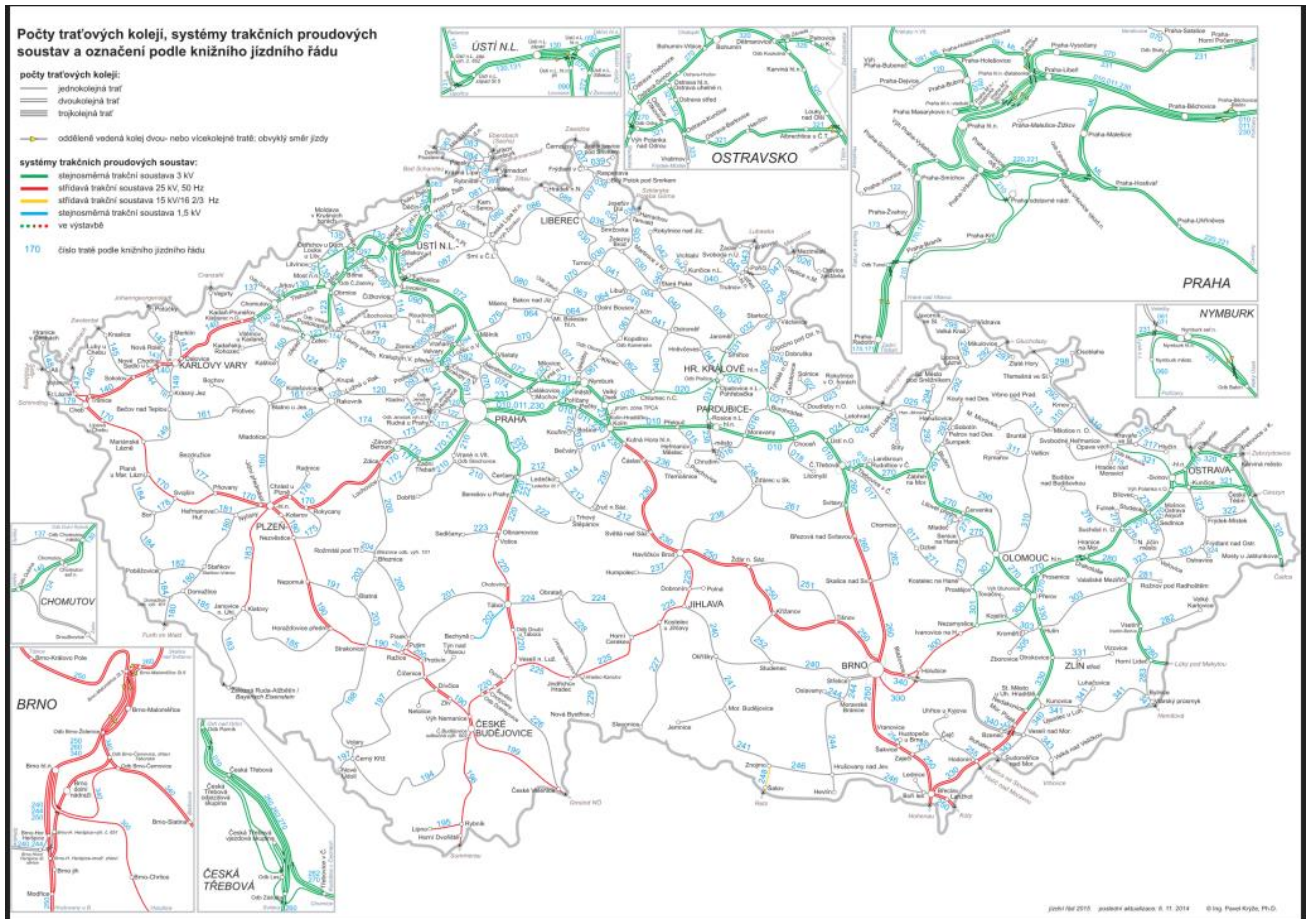
- vysoká jmenovitá účinnost EHV, okolo 90 %,
- relativně vysoká jmenovitá účinnost el. vozby jako celku,
- schopnost využít různých forem energie – jaderných reakcí, potenciál vody i méněhodnotného uhlí, což jiné druhy vozby nedokáží.[1]

4.2 Elektrizace drah v ČR a Evropě

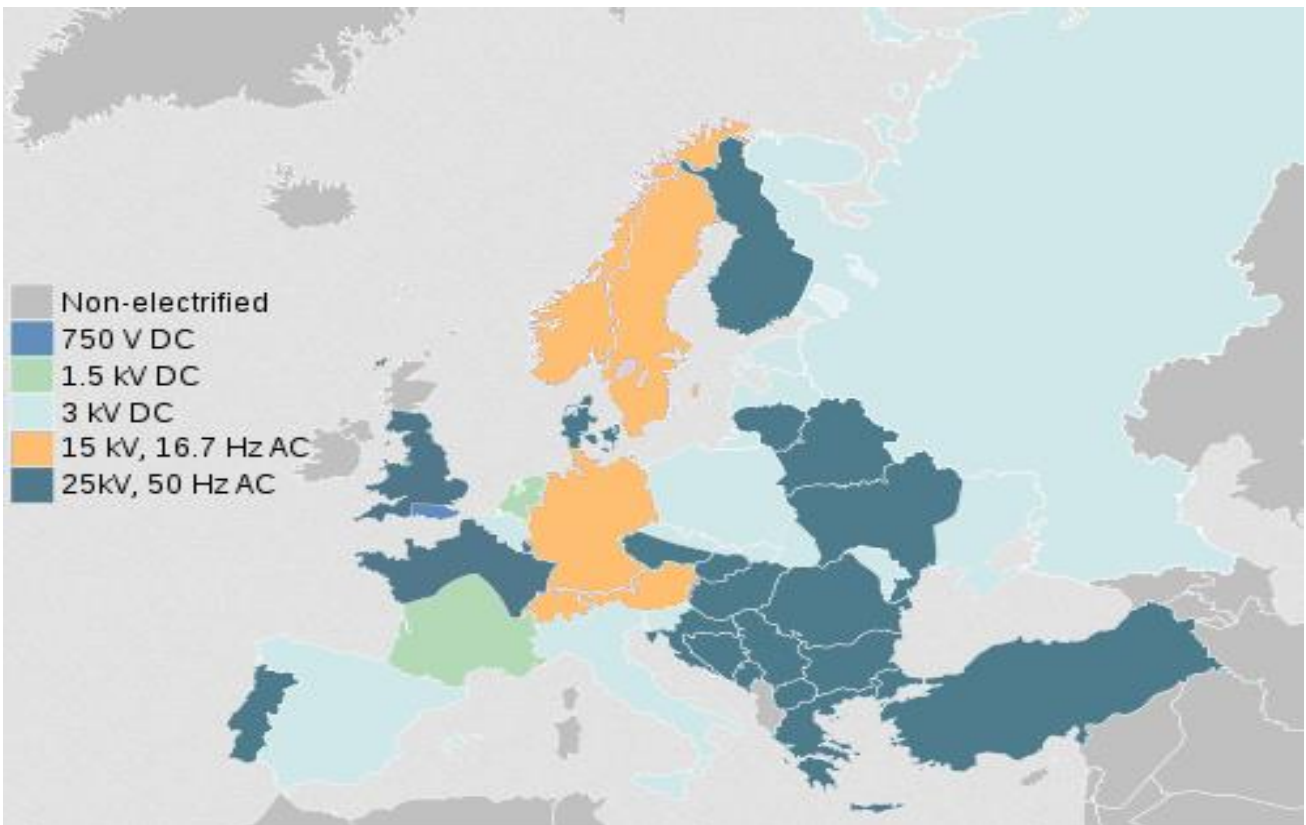
Vývoj elektrizace v Českém území se ubíral nejprve směrem k napájení stejnosměrnému, především díky práci inženýra Františka Křižíka. První elektrizovanou tratí na našem území byla v roce 1891 tramvajová trať v Praze a vedla z Výstaviště na Letnou. První elektrizovanou železniční tratí byla v roce 1903 trať mezi Bechyní a Táborem. Napětíové hladiny, na kterých docházelo k napájení, se postupem času ustálily na hodnotách 600 V, 750 V, 1500 V. Tyto napájecí systémy jsou používány dodnes, zejména pro napájení drah městských. Významnou úlohu v železniční trakci hraje napětí 1500 V, především ve Francii nebo v Nizozemsku. Z Francie byl tento systém převzat a realizován zejména v okolí Prahy. [3] [15] [18]

Dalším obdobím, které se zapsalo do historie železnic, byl konec 40. let, kdy docházelo k dalšímu rozšiřování elektrizace. Vzhledem k narůstajícím požadavkům na výkon sítě, který je úměrný napětí a nepřímo úměrný podélné impedanci vedení, došlo k navýšení používaného stejnosměrného napětí na 3 kV ve stejnosměrných napájecích soustavách. [3] [15] [18]

V Evropě se začala prosazovat střídavá napětíová soustava s parametry 25 kV, 50 Hz v 60. letech 20. století. Rozmach této soustavy byl způsoben rozvojem polovodičové elektrotechniky. Roku 1959 bylo rozhodnuto, že tento systém bude zaveden i v Československu. Jelikož docházelo k dokončování tratě z Děčína do Košic stejnosměrnou napětíovou soustavou, došlo k rozdělení území na severní a jižní část. Severní část území Českého a Slovenska byla elektrizována na stejnosměrnou napětíovou soustavu 3 kV a jižní část Česka zase na střídavou napětíovou soustavu 25 kV, 50 Hz viz. Obr. 1. [3] [15] [18]



Obrázek 1 - Elektrizace železnic v ČR [3]



Obrázek 2 - Elektrizace železnic v EU [15]

4.3 Napájení elektrizovaných drah

Trakční napájecí stanice elektrizovaných tratí jsou zařízení, která pro vozidla se závislou elektrickou trakcí zprostředkovávají dodávku elektrické energie. Jejich úkolem je, aby bylo možné vozidlem odebírat elektrickou energii z trakčního vedení v kterémkoli místě trati. Trakční napájecí stanice tedy umožňují elektrickým vozidlům vykonávat dopravní práci. [4]

4.3.1 Přívod proudu

Do elektrických vozidel se přívod proudu provádí kontaktním vedením podél trasy dráhy, které tvoří soustavu rozvodu trakčního proudu nazývané trakční sítě. Skladbu tvoří obvykle vrchní, případně i spodní vedení, izolované od země a dále zpětné vedení jízdními kolejnicemi, popřípadě také zvláštní zpětnou kolejnicí. V případě elektrických drah bezkolejných (trolejových, provozovaných trolejbusy) a některých zvláštních důlních drah je přívod a odvod proudu vozidel realizován dvoupólovým vrchním trolejovým vedením. [18]

4.3.2 Napájení trakční sítě

Napájení trakční sítě elektrickou energií je prováděno v úsecích z elektrických napájecích stanic, jejichž druhy závisí na trakční proudové soustavě. Napájení může být prováděno pomocí trakčních transformoven, trakčních měničů, nebo spínacími stanicemi. [2]

Transformovny

Hlavním zařízením transformoven jsou silové transformátory, pomocí kterých snižujeme nebo zvyšujeme napětí na vhodnou hodnotu buď k přenosu na velkou vzdálenost (zvyšování napětí), nebo vhodnou pro spotřebitele (snižování napětí). Transformovny slouží k transformaci obvodových parametrů střídavé proudové soustavy. [4]

Spínací stanice

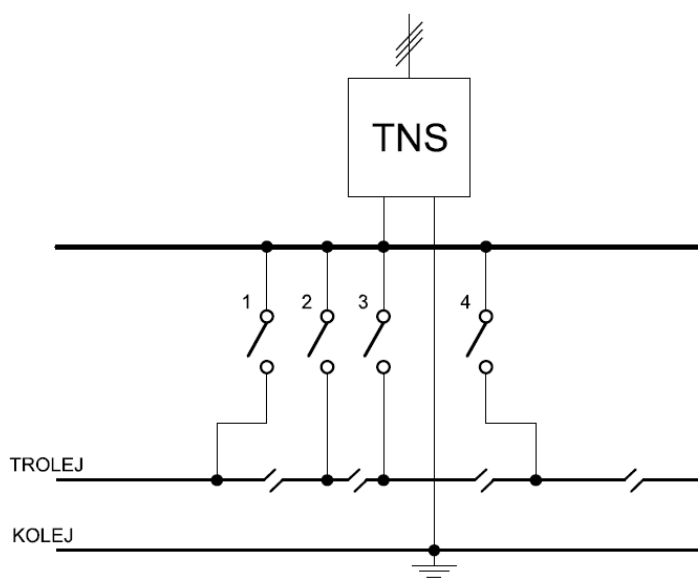
Jedná se v podstatě o malé rozvodny sloužící k rozvodu elektrické energie stejného napětí. Jejich obvyklé umístění je v uzlu sítě, nebo mezi úseky trakčního vedení. Umožňují manipulaci s vedením, tj. rozepínání a spínání. [4]

Měničny

Stejnosemřné rozvaděče a měničny (usměřňovací stanice nebo trakční měničny) pracují na principu přeměny střídavého elektrického proudu na stejnosemřný elektrický proud a dále k jeho rozvodu. [4]

Jednostranné napájení

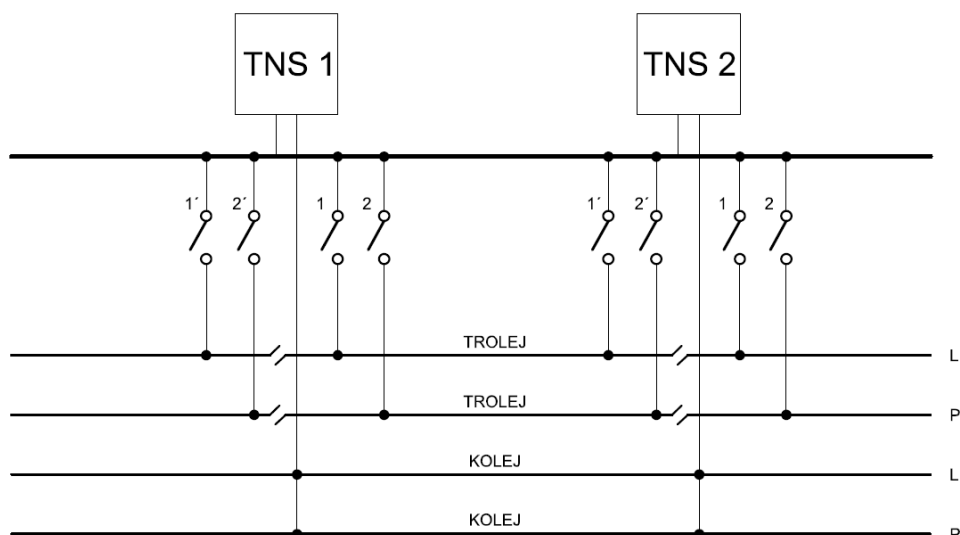
Uskutečňuje se jako soustředěné (převážně u městských drah), kdy z jedné napájecí stanice (NS) je přiváděn proud kabely do několika napájecích úseků, nebo rozložené, kdy NS napájí vždy jen dva sousední napájecí úseky. [1]



Obrázek 3 - Jednostranné soustředěné napájení (převzato a upraveno z [1])

Dvoustranné napájení

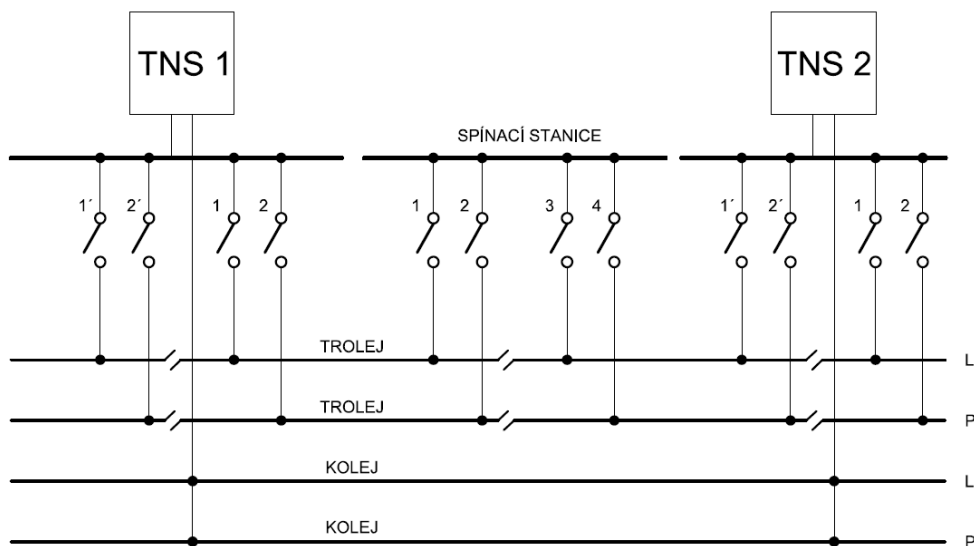
Realizuje se zpravidla jako rozložené. U tohoto napájení dochází k napájení jednotlivých úseků ze dvou stran s ohledem na úbytek napětí a proudu tekoucího napájecími vypínačem. Díky tomu je možné prodloužit délku úseku na dvojnásobek (při stejném odporu trakčního vedení a stejném odběru) [1]



Obrázek 4 - Dvoustranné rozložené napájení dvoukolejné tratě (převzato a upraveno z [1])

Čtyřstranné napájení

Použití tohoto typu napájení je možné na dvoukolejném dvoustranně napájeném úseku. V úseku je uprostřed umístěn úsekový dělič a spínací stanice, která umožní vzájemné propojení všech částí trolejového vedení v úseku. [1]



Obrázek 5 - Čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě (převzato a upraveno z [1])

4.3.3 Stejnosměrná soustava (DC) 1,5 kV

Použití této soustavy je spojeno především s počátkem elektrizace na železnicích. V evropských zemích je tento systém používán na jihu Francie a v Nizozemsku. [5]

Výhody:

- snadnější zhášení oblouku,
- lepší vlastnosti při rozjezdu z důvodu možnosti zapojení trakčních motorů do série.

Nevýhody:

- nutnost hustší sítě napájecích stanic,
- nutnost použití zesilovacího vedení kvůli vysokým proudovým hodnotám trakčního vedení. [5]

4.3.4 Stejnosměrná soustava (DC) 3 kV

Jedná se o nejrozšířenější systém elektrizace v Evropě vyvinutý ze soustavy 1,5 kV DC. Výhody i nevýhody této soustavy jsou podobné jako u soustavy stejnosměrné 1,5 kV. U této soustavy jsou nutné vyšší izolační hladiny díky vyššímu napětí. Systém má také zvýšené nároky na spínací prvky, jelikož v síti musí být minimálně 2 trakční motory. [5] [17]

Nevýhodou stejnosměrné soustavy je vznik bludných proudů podél elektrizovaných tratí v okolí napájecích stanic. Tyto bludné proudy způsobují korozi kovových zařízení uložených v zemi (plynovody, kabely, vodovodní potrubí apod.), jež musí být proti těmto vlivům patřičně chráněna speciálními zařízeními. [7]

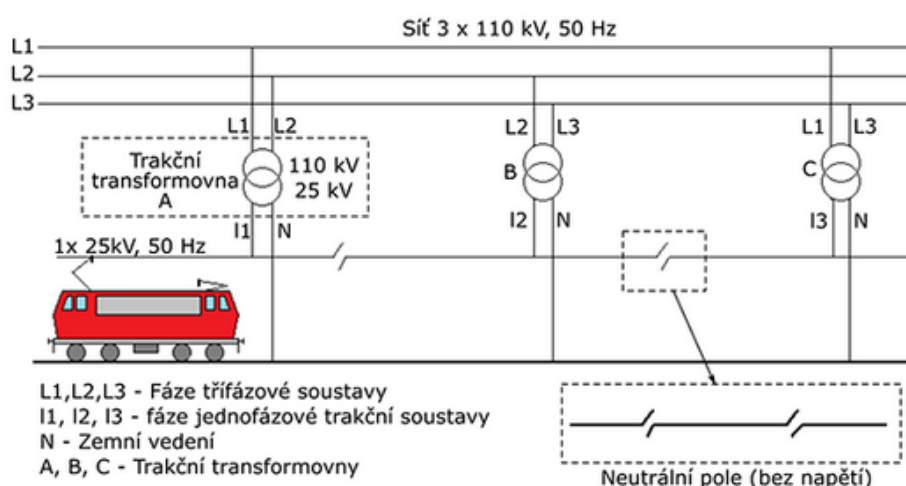
Problematika bludných proudů je spojována pouze se stejnosměrnou soustavou, která není tématem této práce, a proto není dále řešena. Tato práce je zaměřena na řešení problematiky střídavé soustavy 25 kV, 50 Hz kde vliv bludných proudů je zanedbatelný, ale místo toho dochází ke vzniku nebezpečných napětí indukovaných do zabezpečovacích nebo sdělovacích vedení účinkem vazeb magnetických i kapacitních, se střídavým trakčním vedením.

4.3.5 Střídavá soustava sníženého kmitočtu (AC) 15 kV; 16,7 Hz

Soustava vznikla z důvodu problému s použitím frekvence 50 Hz, kdy docházelo k závadám jednofázového komutátorového motoru, a dále zamezení vzniku nežádoucích rezonančních jevů v rozvodné síti. V ČR se můžeme s touto soustavu setkat na krátkém úseku Znojmo-Šatov (státní hranice s Rakouskem) [5]

4.3.6 Střídavá soustava (AC) 25 kV, 50 Hz

AC 25 kV, 50 Hz představuje jeden ze dvou hlavních používaných napěťových systémů v ČR, jedná se o jednofázovou napájecí soustavu. Systémy, které pracují s napětím AC jsou provozovány v paprskovém uspořádání sítě. Soustava neumožňuje oboustranné napájení z důvodu nežádoucích přetoků vyrovnávacích proudů mezi napájecími stanicemi. Pro tuto soustavu budou v praktické části počítány vlivy AC 25 kV, 50 Hz na kabely uložené v zemi. [3] [17]



Obrázek 6 - Schéma napájení 1-f trakční soustavy 25 kV; 50 Hz [5]

Výhody:

- provedení napájecích stanic je jednodušší,
- umožňuje použití nižších průřezů vedení,
- v trolejovém vedení dochází k nižším ztrátám,
- větší vzdálenost mezi napájecími stanicemi.

Nevýhody:

- trojfázová napájecí soustava dodavatele je nesymetricky zatěžována,
- dochází k problémům s rekuperací,
- nutnost kompenzace účinníku. [3]

4.4 Popis vlivů elektrického napájení drah na inženýrské sítě

Všechna silová vedení vn, vvn a trakčního vedení působí na sdělovací nebo zabezpečovací vedení formou dvou typů ovlivňujícího vedení. Jedná se o vedení vůči zemi symetrických a vedení vůči zemi nesymetrických. [7]

Symetrické vedení

Do této skupiny patří všechna vedení, která mají v normální provozu na svých vodičích napětí vůči zemi, přičemž jimi protéká stejný proud. Příkladem tohoto druhu vedení jsou třífázová vedení vn a vvn pracující v soustavě s izolovaným nebo uzemněným nulovým bodem. [7]

Nesymetrické vedení

Tuto skupinu tvoří vedení, u kterých je napětí vůči zemi nesymetrické. Hlavním znakem je použití země jako zpětného vodiče (např. u trakčního vedení). [7]

Nesymetrické vedení má charakteristickou zvláštnost, kterou je zbytkové napětí (napětí nulového bodu vůči zemi) a zpětný zemní proud. V případě, že pracovní napětí je rovno zbytkovému napětí a pracovní proud se rovná zpětnému zemnímu proudu, nazývá se takovéto vedení plně symetrické. [7]

4.4.1 Základní pojmy

Redukční činitel

Dle normy ČSN 34 2040 ed. 2 „*poměr výsledného elektromotorického napětí indukovaného ve sdělovacím a zabezpečovacím vedení při uplatnění snižujících účinků kovových obalů kabelů, sousedních vodičů a kovových konstrukcí k elektromotorickému napětí, které by se indukovalo ve sdělovacím a zabezpečovacím vedení bez snižujících účinků kovových obalů, vodičů a konstrukcí,*“ [11]

Koeficienty citlivosti

Koeficienty, které jsou používány k výpočtům složek indukovaného psofometrického elektromotorického napětí, způsobovaných nesymetrií okruhu proti sousedním vodičům a proti zemi. [9]

Obecný souběh

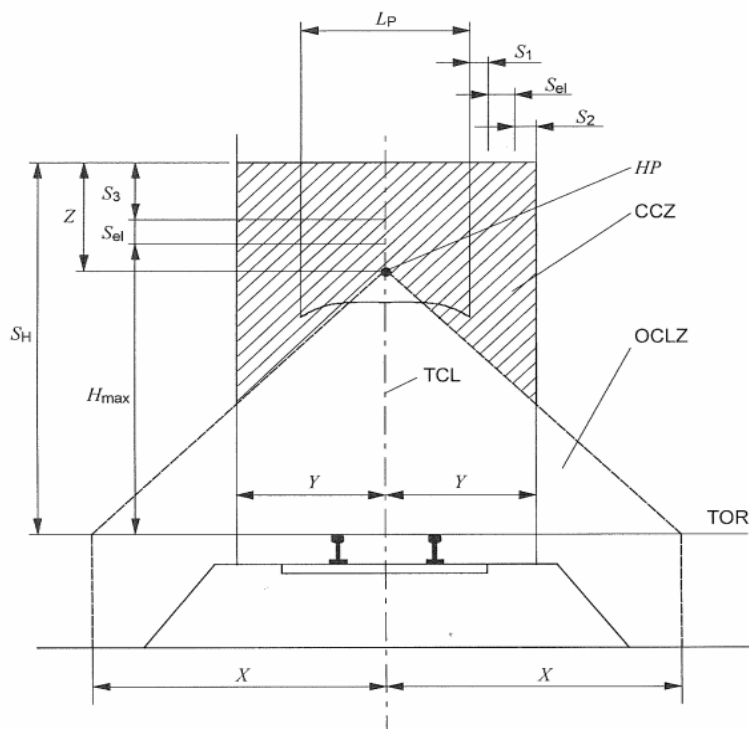
Skládá se z nerovnoběžných a eventuálně i rovnoběžných úseků, kde dochází k souběhu dvou vedení. [9]

Podélné elektromotorické napětí

Elektromotorické napětí indukované elektromagnetickým střídavým polem trakčního proudu v obvodu, který je tvořen zemí a vodiči sdělovacího nebo zabezpečovacího vedení. [9]

Prostor ohrožený trakčním vedením (POTV)

Normou ČSN 34 1500 ed.2 ZMĚNA Z1 je dáno, že POTV je geometricky vymezený prostor, u kterého se předpokládá, že pokud nastane porucha trakčního vedení může v tomto prostoru dojít k přenosu napětí na vodivé části. [9]



Obrázek 7 - Prostor ohrožený trakčním vedením (POTV) [9]

Legenda

TOR	temeno kolejnice
HP	nejvyšší bod trolejového vedení
OCLZ	oblast trolejového vedení
CCZ	pantografová oblast
TCL	osa koleje
X	maximální jednostranná (poloviční) horizontální vzdálenost od osy koleje OCLZ, v úrovni temene kolejnice
Y	maximální jednostranná (poloviční) horizontální vzdálenost CCZ
Z	vzdálenost mezi HP a S_H
S_1	šířka bočního pohybu sběrače; (příčná tuhost)
S_2	boční bezpečná vzdálenost pro poškozený nebo uvolněný sběrač
S_3	vertikální bezpečná vzdálenost pro poškozený nebo uvolněný sběrač
S_{el}	elektrická vzdušná vzdálenost podle EN50119
S_H	maximální výška pantografu
L_P	šířka pantografu
H_{MAX}	maximální výška plně zdvihnutého pantografu

Napěťová soustava	Parametr		
	X	Y	Z*
DC 3 kV; 1,5 kV	3000	1700	400
AC 25 kV; 50 Hz	3000	1800	600

* U prostého trolejového vedení, kdy nejvyšší živou částí je trolejový vodič, musí být parametr Z zvětšen o zdvih trolejového vodiče při maximálním přítlaku sběrače (pantografu)

V oblouku o poloměru menším než 1600 m se vnitřní část základny trojúhelníku (parametr X) zvětšuje u poloměru:

800 m - 1600 m	na 4000 mm
600 m - 800 m	na 4500 mm
do 600 m	na 5000 mm

Tabulka 2 - Hodnoty parametrů X, Y, Z [10]

Provozní stav trakčního vedení

Stav, při kterém všechny napájecí stanice traťového úseku napájí trakční vedení. [9]

Mimořádný stav napájení trakčního vedení

Stav, při kterém je některá z napájecích stanic dočasně mimo provoz [9]

Venkovní vedení

Vedení vybudované nad zemí pomocí podpěr, sloupů, vodičů, izolátorů apod. [9]

Trolejový vodič

Na vozidle je upevněn sběrač proudu, který přiléhá k tomuto vodiči. [9]

Místní kabel

Kabel určený pro místní sdělovací nebo zabezpečovací síť. [9]

Dálkový kabel

Spojuje vnitrostátní nebo mezinárodní síť na větší vzdálenosti. [9]

Závěsný kabel

Kabel zavěšený na nosném laně na venkovních podpěrách nebo na sloupech. [9]

Uložený kabel

Pancéřový kabel ukládaný přímo do země. [9]

Měrná vodivost půdy

Tato veličina má přímý vliv na hodnotu činitele vzájemné indukčnosti, a tím také na hodnotu indukovaného elektromotorického napětí. Je závislá na geologické struktuře půdy, klimatických podmínkách a také na kmitočtu ovlivňujícího proudu. Zvětšená hodnota podélného elektromotorického napětí indukovaného ve sdělovacím nebo zabezpečovacím vodiči je závislá na zmenšení specifické vodivosti půdy, což dále souvisí také fyzikálně s šířením zpětného proudu v zemi. [7]

Hodnota měrné vodivosti půdy se stanovuje pomocí měření v terénu v průběhu uvažovaného vedení. Měření lze provádět několika metodami, které jsou popsány v kapitole 4.10. Na přesném určení měrné vodivosti půdy podstatně závisí i následná přesnost výpočtů rušivých a nebezpečných napětí. [7]

Charakter půdy	Rezistivita [Ωm]
Bažinatá půda	Od několika jednotek do 30
Naplaveniny	20 až 100
Humus, prst'	10 až 150
Vlhká rašelina	5 až 100
Tvárný jíl	50
Vápenatý a kompaktní jíl	100 až 200
Jurský jíl	30 až 40
Jílovité písky	50 až 500
Křemenné písky	200 až 3000
Holé kamenité půdy	1500 až 3000
Zatravnění kamenité půdy	300 až 500
Měkký vápenec	100 až 300
Kompaktní vápenec	1000 až 5000
Rozpukaný vápenec	500 až 1000
Břidlice	50 až 300
Mikanitová břidlice	800
Žula a pískovec podle míry zvětrání	1500 až 10000
Žula nebo velmi zvětralý vápenec (podle míry zvětrání)	100 až 600

Tabulka 3 - Rezistivita půdy [14]

Redukční činitel železničních kolejí

Hodnota redukčního činitele kolejí je závislá do značné míry na vzdálenosti kolejnic od ovlivňujícího vedení a na parametrech kolejového pásu. Přesnější výpočet redukčního činitele je velmi obtížný a není tématem této práce. Z tohoto důvodu budou hodnoty, použité při výpočtech, odečteny z tabulky dle ČSN 34 2040 (příloha 3). [7]

Pro matematické odvození platí vztah:

$$r_K = 1 - \frac{Z_{AK} \cdot Z_{CK}}{Z_{AC} \cdot Z_K} \quad [4.0] [7]$$

kde $Z_K = R_K + jL_K$ reprezentuje impedanci kolejnic [Ω/km]

r_K je redukční faktor kolejí [-]

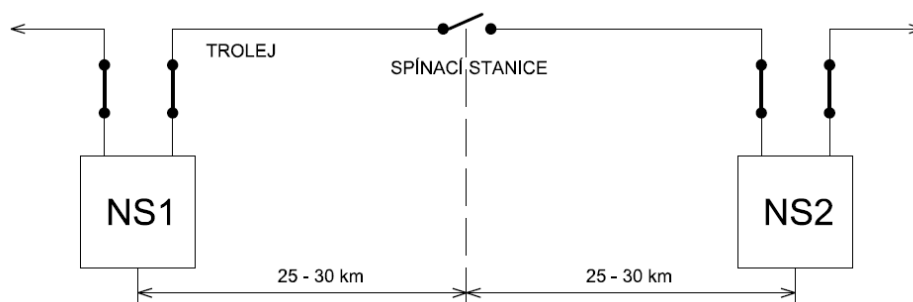
Z_{AK}, Z_{CK}, Z_{AC} jsou vzájemné impedance v dané soustavě [Ω] [7]

4.5 Stavy trolejového vedení

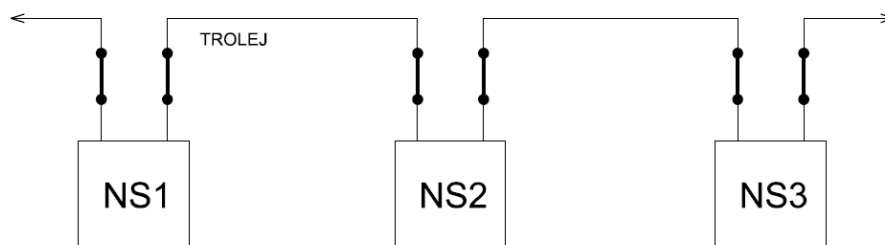
Pro výpočet rušivých a nebezpečných vlivů trakčního vedení jsou důležité tři stavy trolejového vedení, a to normální stav, mimořádný stav a havarijný stav.

Normální stav

V tomto případě je trolejové vedení napájeno všemi napájecími stanicemi, které do něho dodávají jmenovitý proud. Napětí v trolejovém vodiči je 25 kV, může však kolísat v rozmezí 19–27,5 kV. [6]



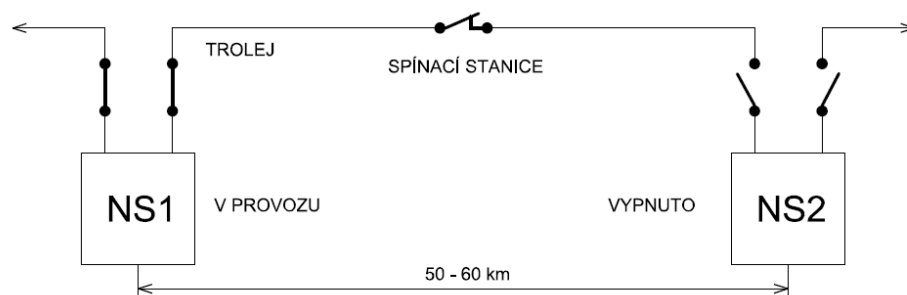
Obrázek 8 - Jednostranné napájení normální stav (převzato a upraveno z [6])



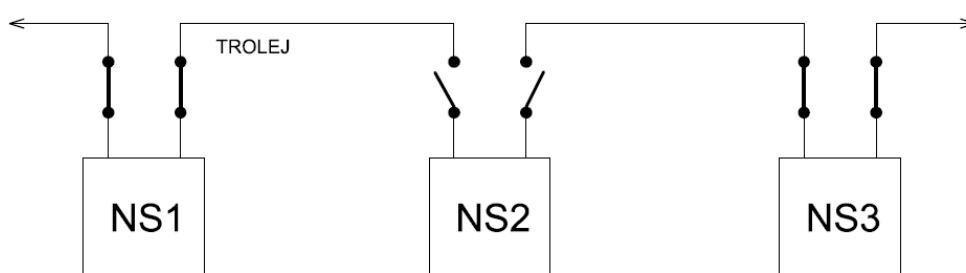
Obrázek 9 - Dvoustranné napájení normální stav (převzato a upraveno z [6])

Mimořádný stav

Jako mimořádný stav se uvažuje takový stav trakčního vedení, kdy je mimo provoz některá z napájecích stanic. Její funkci potom přejímá pomocí spínací stanice některá ze sousedních napájecích stanic. [6]



Obrázek 10 - Jednostranné napájení mimořádný stav (převzato a upraveno z [6])



Obrázek 11 - Dvoustranné napájení mimořádný stav (převzato a upraveno z [6])

Havarijní stav

U toho stavu dochází k poškození trakčního vedení zemním zkratem. Tento stav může nastat buď zkratem v samotné lokomotivě, nebo následkem přetržení trolejového vedení. [6]

Při zkratu dochází k poklesu napětí v trolejovém vodiči na hodnotu blízkou nule a vedením protéká proud o značné hodnotě tak dlouho, dokud příslušné ochrany v napájecí stanici postižený úsek neodpojí. Hodnota tohoto proudu závisí v první řadě na vzdálenosti místa od napájecí stanice. [6]

Kabelová, venkovní, silová i trolejová vedení železnic elektrizovaných AC 25 kV; 50 Hz, vytváří v sousedních vedeních nebezpečná a rušivá indukovaná napětí. Tato napětí mohou zařízení a vedení, která jsou na vedení připojena, poškodit, popřípadě mohou také procházející signál tímto vedením znehodnotit. Působení silových vedení můžeme rozdělit na vlivy nebezpečné a vlivy rušivé. [7]

4.6 Působení rušivých a nebezpečných vlivů na vedení

Následující kapitola obsahuje popis působení rušivých a nebezpečných napětí na kabelová vedení.

Rušivé vlivy

Uplatňují se při mimořádném nebo normálním stavu trolejového vedení. Napětí, které je tímto vlivem ve vedení vyvoláno, znehodnocuje signál, jenž prochází tímto vedením. Přenášený signál je znehodnocován kombinací indukovaných napětí o různých kmitočtech a o různých hodnotách. Kmitočty jednotlivých složek rušivého napětí jsou harmonickými násobky základního kmitočtu ovlivňujícího napětí.

Jelikož je lidské ucho na přicházejících podnětech kmitočtově závislé, zmíněné harmonické složky nepůsobí stejným akustickým účinkem. Je tedy nutné zhodnotit stupeň rušení z hlediska tohoto subjektivního účinku. Tento podnět vedl k zavedení pojmu psfometrické elektromotorické napětí. [7]

Nebezpečné vlivy

Vliv, který se uplatňuje při havarijním, mimořádném a někdy také i při normálním stavu trolejového vedení. Působením těchto vlivů se ve vodičích sdělovacího nebo zabezpečovacího vedení indukují vysoká napětí. Stupeň nebezpečného vlivu lze určit se zřetelem na možnosti poškození připojeného zařízení, nebo poškození sdělovacího (zabezpečovacího) vedení. Dále také s ohledem na ohrožení zdraví osob pracujících na zařízeních nebo na vedeních. Stupeň ohrožení lidského organismu je dán dle doby, po jakou prochází elektrický proud postiženým organismem, a proto rozdělujeme nebezpečný vliv na krátkodobý, dlouhý a trvalý. [7]

Krátkodobý vliv – doba působení 0,5 – 1,5 s. Vyvolán zkraty v lokomotivě nebo zemními zkraty trolejového vedení.

Dlouhodobý vliv – doba působení několik minut až několik hodin. Způsoben mimořádným stavem trakčního vedení.

Trvalý vliv – působí při normálním provozu střídavé trakce. [7]

4.7 Základní teorie nebezpečných a rušivých vlivů

Typickým nesymetrickým vysokonapětovým vedením je jednofázové trolejové vedení 25 kV; 50 Hz. Toto vedení způsobuje ve svém okolí elektromagnetická a elektrostatická pole. Tato pole indukují ve všech křížujících i souběžných vedeních a kovových konstrukcích proudy a napětí, jenž se projevují jako rušivé nebo dokonce i nebezpečné. Všechna vedení, venkovní konstrukce i vedení uložené v zemi podléhají indukčním vlivům, kapacitním vlivům podléhají pouze vedení a venkovní konstrukce, tzn. ta, která sice jsou spojena se zemí, ale proti zemi mají odpor v řádech tisíců ohmů a více. [8]

Mimo základní frekvenci trakčního proudu, vznikají v trakčním vedení vyšší harmonické složky napětí a proudu díky rezonančním vlivům. Tyto složky mají rušivý vliv na zabezpečovací (sdělovací) venkovní vedení, ale mohou se také projevit i ve vedeních televizních nebo rádiových.

Charakter nebezpečných nebo rušivých vlivů je závislý na druhu trakčního proudu (střídavý průmyslového kmitočtu, stejnosměrný, střídavý sníženého kmitočtu apod.), ale také na režimu vedení, tj. jde-li o zkratky nebo normální provoz. [8]

Kapacitní vlivy se nepříznivě projevují do vzdálenosti cca 100 m od trolejového vedení. Indukčním vlivům trakčního vedení mohou být vystavena konstrukce a všechna vedení do vzdálenosti cca 5 km. [8]

4.7.1 Elektromagnetické vlivy

Protékajícím střídavým proudem v trolejovém vedení vzniká časově proměnné magnetické pole. Na základě tohoto průtoku se v souběžných vedeních indukuje podélné elektromotorické napětí, které je opačného směru oproti směru proudu, který jej vyvolal. [8]

Velikost elektromotorického napětí vypočteme ze vzorce

$$e_M = k \cdot M \cdot \frac{di}{dt} \cdot l \quad [4.1]$$

k je redukční koeficient vyjadřující vliv paralelních kovových souběhů (např. počtu kolejí)

l je délka souběhu v km [8]

M je koeficient vzájemné indukčnosti, kdy jeho velikost závisí na

- kmitočtu trakčního proudu f [Hz],
- vzdálenosti souběžných vedení v metrech a [m],
- střední vodivosti země σ [$\frac{S}{m}$]. [8]

Koeficient je tedy dán vztahem

$$M = a \cdot \sqrt{10} \cdot \sigma \cdot f \quad [4.2]$$

U kovových konstrukcí nebo vedení, které je od země izolováno (zejména potrubí), dochází k rozdělení indukovaného napětí rovnoměrně na oba otevřené konce. V případě, kdy je na jednom konci vedení nebo konstrukce uzemněno, projeví se celé indukované napětí na neuzemněném konci. Za předpokladu, že jsou oba konce uzemněny, je v těchto bodech indukované napětí nulové, avšak vedením protékají indukované proudy. [8]

Pokud do vzorce pro podélné elektromotorické napětí indukované v kovových vedeních podél elektrizovaných tratí zakomponujeme trakční proud I , dostaneme upravený vzorec [4.1] na výraz [8]

$$e_M = 2\pi \cdot f \cdot I \cdot k \cdot M \cdot l \quad [4.3]$$

4.7.2 Elektrostatické vlivy

Podél elektrizovaných železnic podléhají elektrostatickým vlivům všechny venkovní konstrukce a všechna venkovní vedení. Elektrostatické vlivy lze stanovit dle vzájemné polohy venkovních vedení nebo konstrukcí, které jsou tomuto vlivu vystaveny, s polohou trakčního vedení. Na základě výzkumné zprávy VÚD je možno uvažovat nebezpečný kapacitní vliv v případě, kdy je trakční vedení vzdáleno méně než

$$a = \frac{1}{4} \cdot U \cdot l \quad [m; V; km] \quad [4.4]$$

kde U je provozní napětí trakčního vedení (V)

l je délka souběhu (km) [8]

Ve vzdálenosti cca 1 m od trakčního vedení 25 kV může elektrostatický vliv vyvolat napětí až 8 kV u jednokolejných tratí a u dvoukolejných tratí až 11 kV. Toto napětí není sice samo o sobě nebezpečné, ale nebezpečné jsou vybíjecí proudy.

Vybíjecí proudy závisí na velikosti náboje, z toho důvodu je rozhodujícím faktorem pro posouzení nebezpečí, plynoucího z elektrostatického vlivu kromě vzdálenosti konstrukce od trakčního vedení a velikosti trakčního proudu, také tvar ovlivňovaného předmětu. [8]

Není-li předmět dosti rozměrný a jeho tvar vhodný tak, aby posloužil jako kondenzátor s vysokou kapacitou, elektrostatický vliv není prakticky nebezpečný. Pokud je ovlivňovaný předmět uzemněn, napětí zmizí, ale spojovacím vodičem prochází proudy o efektivní hodnotě. [8]

$$I = U \cdot \omega \cdot C \quad [4.5]$$

kde C je kapacita mezi trakčním vedením a ovlivňovaným předmětem. [8]

4.8 Vzájemné vlivy elektrických zařízení

Vzájemná interakce a vzájemné působení elektrického zařízení rozlišujeme na přímé nebo nepřímé působení. [1]

4.8.1 Přímé působení

Jedná se o vlivy mezi napájecí energetickou sítí a odběrateli elektrické energie (elektrickými spotřebiči). Tyto vlivy vyvolávají zhoršené funkce příslušných zařízení, a proto musí být stanovena určitá kompatibilita. Do přímé interakce zahrnujeme vzniklé vyšší harmonické napětí a proudy, nesymetrie napětí a proudů, resp. napájení trojfázových spotřebičů nesymetrickým napětím a kolísání napětí. [1]

Kolísání je způsobeno odběrem a ovlivňuje jiné, na energetickou síť připojené spotřebiče, jakož i obsluhující personál. Na uložená zařízení v zemi působí korozivní vlivy, které vznikají působením přímých vlivů. [1]

4.8.2 Nepřímé působení

Nepřímé působení obsahuje nejen druh vzájemné vazby a účinek, ale i dobu jeho trvání. Rozlišujeme vlivy podle vzájemné vazby na kapacitní, indukční a vlivy galvanické. [1]

4.8.3 Kapacitní vlivy

Jedná se o vliv elektrického pole, který je vyvolán silnoproudým vedením a působí na jiné silnoproudé, sdělovací nebo zabezpečovací vedení. Kapacitní vliv je podmíněn přítomností střídavého elektrického napětí v trolejovém vedení. [11]

Účinky se projevují na nadzemních vedeních, mimo samonosné a závěsné kabely s kovovým uzemněným pláštěm. Tento vliv není nutno uvažovat v případě, že nadzemní vedení je vzdáleno od trakčního vedení více než 100 m. [1] [11]

4.8.4 Indukční vlivy

U indukčních vlivů dochází k vlivu magnetického pole s analogickým dopadem i vznikem jako u vlivu kapacitního. Jeho vznik je způsoben průchodem elektrického střídavého proudu trolejovým vedením. Projevují se na všech kabelových i nadzemních vedeních. Oblast, kterou induktivní vazba zasahuje okolí, je v okruhu cca 5 km od železniční tratě. [9]

Mezi prvky, které ovlivňují vznik indukčních vlivů patří např. redukční činitel vlastního vedení (kabel, plynovod), redukční činitel kompenzačního vedení (kabelové pláště, zemnicí lano, plynovod zemněný). Všechny indukční vlivy je nutné počítat pro každé vedení dle konkrétního stavu. V případě, kdy průměrná vodivost půdy je $2 \cdot 10^{-2}$ S/m, je při vzdálenosti cca 1,3 km induktivní vliv mizivý. [13]

Indukovaná napětí

Při souběhu kabelů a plynovodů s provozovanou železniční střídavou trakcí se do vedení indukují elektromotorická napětí, která lze vyjádřit ze vzorce [5.0]. Odvození tohoto vzorce bylo zjednodušeně popsáno v kapitole 4.7.1. [13]

$$E = \omega \cdot M \cdot I \cdot l \cdot r \cdot 10^{-3} \quad [5.0]$$

kde ω je úhlový kmitočet trakčního proudu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

M je vzájemná indukčnost $\mu\text{H}/\text{km}$

I je ovlivňující proud tekoucí trolejovým vedením v ampérech [A]

r je redukční činitel (výsledný)

– součin redukčních činitelů kolejnice a zabezpečovacího kabelu.

l je délka souběhu vedení [km]

Indukovaná elektromotorická napětí obvykle přesahují dovolené hodnoty při zkratových proudech. Dle rozboru vzorce [5.0] je patrné, že velikost elektromotorického napětí je závislé při zkratech na výkonu transformačních stanic. [13]

Dále je velikost elektromotorického napětí závislá na vzdálenosti zkratu od zdroje a na velikosti vzájemné indukčnosti M , tzn. na měrném odporu půdy a vzdálenosti souběhu. [13]

4.8.5 Galvanické vlivy

Tento vliv je většinou vyvolán poruchovým stavem silnoproudého zařízení. Můžeme jej charakterizovat jako vliv proudu tekoucího zemí se stejným dopadem jako u kapacitního vlivu. Galvanická vazba se projevuje na okruzích, používající zem pro vedení zpětného proudu. Vedení, které je ovlivněno, má obecně odporové (v limitě čistě galvanické) spojení s vedením ovlivňujícím. [1] [9] [11]

Galvanickou vazbu uvažujeme v případě, kdy dochází ke křížení vedení nebo pokud je vzdálenost vedení menší než 5 m od nejbližšího stožáru, nejbližší koleje nebo ukolejnění kovových konstrukcí. [1] [13]

4.9 Zkraty na vedeních střídavé trakce

Vodivé spojení mezi jednotlivými fázemi elektrické sítě, popřípadě i mezi některou fází a zemí v soustavách s účinně uzemněným uzlem nazýváme zkratem. Toto poruchové spojení vyvolá navýšení proudu nad obvyklou hodnotu. Při vzniku zkratu jsou proudy omezovány pouze impedancemi alternátorů, spojovacích vedení a transformátorů. V místě zkratu klesne napětí na nepatrnou velikost (za předpokladu dokonalého zkratu až na nulu). [12]

Pokud dojde ke zkratu na trakčním vedení nesmí hodnota indukovaného elektromotorického napětí na konstrukcích přesáhnout 400 V, v oblasti zkratových proudů pak 2500 A. [12]

Tyto zkratové proudy musí být odpínány bez časového zpoždění ochran (od napájecí stanice odpovídá vzdálenost zkratu cca 10 km) a v oblasti menších zkratových proudů nesmí hodnota indukovaného elektromotorického napětí přesáhnout 230 V. Časové zpoždění, kterým mohou být tyto proudy odpínány je do 0,6 s. [8]

Jednofázové nebo dvoufázové zkraty na souběžných vedeních vn a vvn s dálkovým kabelem, i když jsou tyto situace krátkodobé a výjimečné, vytváří ve svém okolí elektromagnetická střídavá pole. Elektromagnetická střídavá pole indukují v žilách kabelů a v pláštích nežádoucí napětí a proudy. Tato napětí se posuzují z hlediska nebezpečí jako „nebezpečná napětí“ (indukované elektromotorické napětí). [13]

Další posouzení je z hlediska průrazů izolace kabelů nebo zařízení připojených na ohrožená vedení, jelikož obojí ohrožuje obsluhu při dotyku s vodiči i neživými částmi sdělovacích nebo zabezpečovacích zařízení. V poslední řadě dochází k posouzení rušení přenosů „rušivých napětí“, protože zkraty jsou přechodovými jevy obsahující vyšší harmonické. [13]

Zkraty na troleji 25 kV, 50 Hz

U této střídavé trakční soustavy vznikají zkraty troleje se zemí, které způsobují zkratový proud I_z (při reaktanci rozvodny asi 8–10 % a zkratovém výkonu asi 1000 MVA). Velikost I_z je asi 4,5 kA a zmenšuje se se vzdáleností od místa zkratu. [13]

V kabelech jsou vytvářena indukovaná elektromotorická „nebezpečná napětí“, která jsou závislá na vzdálenosti místa zkratu od transformátoru, jejichž velikosti jsou snižovány stínícími účinky souběžných vedení. V kabelech nepříznivě působí kromě zkratových proudů také účinky mimořádných provozních stavů. V obou zmíněných případech vznikají rušivé vlivy, které hodnotíme podle velikosti psfometrického elektromotorického napětí. [13]

U železnic se pro zkraty troleje používá obvykle zkratový proud $I_r = 2$ A. [13]

4.10 Měřicí metody v oboru rušivých a nebezpečných vlivů

Z hlediska organizace a provádění měření můžeme rozdělit měření do několika skupin podle jejich charakteru, která jsou podrobněji popsána v následujících kapitolách 4.10.1–4.10.5. [7]

4.10.1 Měření prováděna na projektovaných tratích

Tato měření se provádějí před zahájením projekce sdělovacího nebo zabezpečovacího vedení, obvykle společně s geochemickým průzkumem budoucích tratí sloužícím potřebám protikorozi ochrany. [7]

Cílem měření je získat místa souběhu s trakčními a silovými vedeními (se všemi objekty, se kterými mohou přijít svým vlivem do styku s vedením sdělovacím nebo zabezpečovacím). Dalším parametrem měření je měrná vodivost půdy, která se provádí měřením ekvivalentního rušivého napětí a proudu na trakčním vedení. Zjišťuje se také tvarový činitel proudu v ovlivňujícím vedení. Mezi další nutná měření patří měření redukčního činitele kabelu určeného pro trať, a to v laboratorních podmínkách. [7]

4.10.2 Měření prováděna při ovlivnění dosavadními vedeními

V případě těchto měření se provádí zjištění měrné vodivosti půdy v oblasti budoucího souběhu a měření redukčního činitele kabelu položeného v zemi. Pokud okruhy vedení přenášejí nf signál, dochází k měření činitele citlivosti jednotlivých okruhů. [7]

4.10.3 Kontrolní měření

Měření se provádí v určitém časovém období a na vybraném vedení. Zjišťuje se hodnota činitele citlivosti měřeného okruhu, hodnota rušivého napětí a v některých případech i hodnota redukčního činitele. Hodnota redukčního činitele se častěji měří tam, kde hrozí kabelu nebezpečí koroze.

Pokud se při měření zaznamená hodnota zvýšeného rušivého napětí, provede se obvykle další kontrolní měření, jehož úkolem je zjistit, zda zvýšení rušivého napětí při prvním měření není zaviněno nějakou chybou na samotném vedení nebo zařízení. Jestliže je výsledná hodnota druhého kontrolního měření negativní, provede se potom měření na trakčních objektech. [7]

4.10.4 Jednorázová měření

Do této skupiny se řadí měření prováděna jednorázově na různých sdělovacích nebo zabezpečovacích tratích a výsledné hodnoty těchto měření ve většině případů slouží k upřesnění výpočtů rušivých nebo nebezpečných vlivů. [7]

Patří sem převážně měření nebezpečných napětí indukovaných na sdělovacích nebo zabezpečovacích vedeních při zkratových zkouškách trakčního vedení. [7]

4.10.5 Měření indukovaných napětí vlivem trakčního vedení

Při měření jsou použity přístroje o velkém vnitřním odporu (minimálně 0,5 M Ω na 1 V stupnice), tedy měřicích přístrojů elektrostatických nebo elektronických. Pokud je zapotřebí měření dlouhodobého charakteru používají se elektronkové voltmetry nebo selektivní voltmetr, popř. psfometry. Ke krátkodobému měření lze použít elektronický oscilograf s vhodnou filmovou kamerou nebo osciloskop vybavený záznamem. [7]

4.11 Ochranná opatření proti vlivům

Zabezpečovací a sdělovací zařízení se chrání proti rušivým a nebezpečným vlivům vhodnými ochrannými opatřeními přímo v trakční síti. Dále ochrannými opatřeními na samotných zabezpečovacích nebo sdělovacích zařízeních. Přednostně je nutné realizovat ochranná opatření v trakční síti, aby vznik rušivých a nebezpečných vlivů byl co nejvíce omezen. [9]

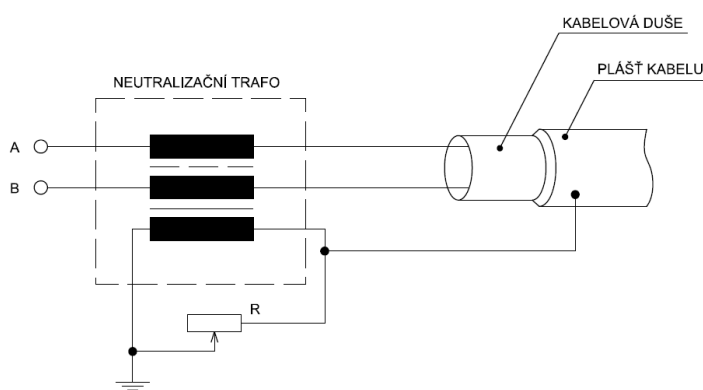
Induktivní vlivy na kabely

Při souběžném vedení dle kapitoly 4.7.1, se snižují indukovaná elektromotorická napětí redukčními činiteli uzemněných Al nebo Pb plášťů (u Al asi 0,1 ve druhém asi 0,8). Mezi nejschůdnější prostředky k snižování indukovaných elektromotorických napětí patří např.: [13]

- neutralizační transformátory,
- odsávací transformátory u střídavé trakce,
- snížení hodnoty redukčního činitele kolejí.

Neutralizační transformátory

Jinak nazývané jako kompenzátory, jsou v zahraničí běžným způsobem ochrany. Zapojení tohoto druhu transformátoru je znázorněno na Obr. 12. Tuto ochranu lze dobře aplikovat u kabelových vedení probíhajících souběžně s kolejemi elektrizovaných drah. Tyto transformátory mají obvykle 3 vinutí. První a druhé vinutí jsou zapojena v sérii s kabelovými žilami a třetí mezi kabelovým pláštěm a zemí, nebo do rozděleného kabelového pláště viz Obr. 12. [7]



Obrázek 12 - Schéma neutralizačního transformátoru (převzato a upraveno z [7])

Jejich ochranný účinek funguje tak, že indukovaný proud tekoucí kabelovým pláštěm vyvolává pomocí třetího vinutí neutralizačního transformátoru v ostatních dvou vinutích napětí s obrácenou polaritou. Díky tomu celková hodnota nebezpečného indukovaného napětí vyvolaného v kabelových žilách se snižuje nebo úplně neutralizuje. [7]

Vinutí transformátorů jsou vybavena potřebnými odbočkami pro zapojení potřebného počtu závitů, aby bylo možno je co nejpřesněji přizpůsobit k chráněnému vedení. Tyto transformátory nezabraňují přenosu stejnosměrného proudu po kabelových vedeních a také nenarušují způsob měření izolace kabelových žil stejnosměrným proudem. [7]

Odsávací transformátory

Ve výjimečných případech lze použít pro ochranu zabezpečovacích a sdělovacích zařízení zapojených do trakčního vedení odsávací transformátory, které lze připojit dvěma způsoby. V prvním případě se zapojuje sekundární vinutí do kolejí, v druhém případě do zvláštního vodiče nazývaného zpětný vodič. Primární vinutí se zapojuje u obou případů do troleje. Při způsobu zapojení dle prvního případu se dosáhne zvětšení kolejového proudu. U zapojení dle druhého způsobu podstatně zlepšíme symetrii trakčního vedení. [9]

Ochranný účinek odsávacích transformátorů bez zpětných vodičů je poměrně malý, podélná elektromotorická napětí, indukovaná ve sdělovacím nebo zabezpečovacím vedení, se v tomto případě sníží přibližně na polovinu. Zapojení se zpětným vodičem je velmi účinné, ale bohužel je také velmi nákladné. Podélná elektromotorická napětí, indukovaná v zabezpečovacím nebo sdělovacím vedení, se sníží v tomto případě přibližně 50 x, čili podél elektrizovaných tratí by mohla být i venkovní vedení. [9]

Výkon odsávacích transformátorů je asi 500 kVA a zapojují se ve vzdálenostech 2–4 km, jako zpětného vodiče se užívá venkovního lana AlFe, který je o elektrovodivém průřezu 175-200 mm². [9]

Trakční síť

Účelem těchto ochranných opatření je zajistit především co nejnižší hodnotu indukujícího, resp. zkratového proudu a co nejrychlejší rozpínání zkratů. Proto je z hlediska ochrany zabezpečovacího a sdělovacího zařízení výhodnější, pokud je trakční vedení napájeno z většího počtu menších napájecích stanic než z menšího počtu velkých napájecích stanic. Rušivé a nebezpečné účinky trakčního vedení se dále sníží, pokud jsou jednotlivé úseky trakčního vedení napájeny z obou stran. [9]

Použití jednostranného napájení dvou sousedních úseků trakčního vedení by mělo být prováděno jen ve výjimečných případech a za podmínky, že tyto úseky jsou napájeny stejnou fází. Jak již bylo uvedeno, požaduje se také, aby zkraty byly co nejrychleji vypínány. Automatické vypínače v napájecích stanicích mají při zkratech v trakčním vedení odpojit trakční vedení nejpozději za 0,3 s. [9]

Intenzita vyšších harmonických složek v trakčním proudu má být, pokud možno, co nejmenší. Vznikají-li v důsledku rezonančních jevů silné rušivé vlivy v zabezpečovacím nebo sdělovacím vedení, mohou být v trakčních zařízeních provedena opatření k vyhlazení rezonančních kmitů, např. vestavěním filtrů nebo útlumových článků. [9]

Redukční činitel kolejí

V rámci ochranných opatření je také důležité zajistit, aby redukční činitel kolejí měl co nejnižší hodnotu.

K tomuto účelu je potřeba zajistit co nejvyšší vodivost kolejové sítě, což se provádí svařováním kolejnicových pásů, prováděním montáže vyrovnávacích spojek mezi kolejnicovými pásy stejné koleje a mezi sousedními kolejemi, a dále spojováním kolejnicových pásů přivařovanými propojkami. [9]

4.11.1 Opatření proti rušivým vlivům

Rušivá napětí se zvětšují příčnou (admitanční) nesouměrností okruhů a rušivé proudy podélnou (impedanční) nesouměrností kabelových okruhů. [13]

Z hlediska ochrany sdělovacích a zabezpečovacích vedení před rušivými vlivy, je nutné se zaměřit na dodržení souměrnosti sdělovacího (zabezpečovacího) vedení proti zemi a proti sousedním vedením. Jakékoliv porušení souměrnosti se projeví značným zvětšením rušivých vlivů. [13]

4.11.2 Opatření proti nebezpečným vlivům

Ochrana proti nebezpečným vlivům může být realizována pomocí bleskojistek, zapojením kabelu nebo sekciování pomocí translátorů. Bleskojistky jsou nejlevnější řešení a dovolují také použití stejnosměrného provozu. Aby nedošlo ke vzniku nebezpečných podélných indukovaných elektromotorických napětí ani při přetržení vodičů, zapojují se bleskojistky na několika místech vedení. K tomuto účelu se používá speciálních vakuových nebo uhlíkových bleskojistek. Uhlíkové bleskojistky mají zapalovací napětí 1000 V, vakuové bleskojistky 230 V. [9]

Vakuové bleskojistky jsou vyráběny s nožovými doteky nebo kruhovými doteky a snesou 150 A během 0,2 s. Nevýhodou toho způsobu ochrany je, že ve vedení vzniká při účinku bleskojistek praskot a je nutno proti němu provádět další ochranná opatření. [9]

4.11.3 Opatření na sdělovacích nebo zabezpečovacích vedeních

Tato podkapitola popisuje opatření, pomocí kterých lze snížit účinky nebezpečných indukujících napětí na sdělovací nebo zabezpečovací kabely a docílit tak bezpečného provozu jednotlivých zařízení.

Vhodný výběr trasy vedení

Vhodný výběr trasy vedení závisí na dodržení tzv. kritické šíře souběhu (vzdálenost mezi vedením sdělovacím nebo zabezpečovacím a trakčním vedením v oblasti souběhu). Důkazem správného výběru této trasy je nižší hodnota rušivého a nebezpečného napětí stanovována výpočtem. Při výběru průběhu trasy vedení je nutno zajistit, aby počet míst souběhu a křížování s trakčním vedením byl co nejmenší. [9]

Ochrana snížením redukčního činitele kabelového pláště

Pro tento účel slouží kabely buď s vodivějším pláštěm, nebo se speciálně upraveným pancířem, popř. se také do profilu sdělovacího nebo zabezpečovacího vedení vkládají dodatečně vodiče z mědi nebo hliníku. [9]

Ochrana prostřednictvím snížení redukčního činitele kabelového pláště spočívá také v zapojení kabelové žíly přes středy translátorů a tlumivku paralelně ke kabelovému plášti. U tohoto řešení dochází ke ztrátě účinku elektrické pevnosti obvodové izolace. [9]

4.11.4 Zvláštní ochrany

Jízdní kolejnice střídavých soustav drah jsou spojeny s uzemněnými kolejnicemi např. s armaturami betonového podloží, se základy stožárů a základy jiných konstrukcí podél trati, jako jsou tunely a viadukty. Pro omezení vlivů na zabezpečovací zařízení může být do připojení vložena např. tlumivka. Jízdní kolejnice a hlavní ekvipotenciální přípojnice napájecí soustavy musí být propojené. PE vodič připojený k neživým částem zařízení, které je umístěno v pantografové oblasti nebo v oblasti trolejového vedení, musí být schopen přenést maximální zkratový proud. Pokud tento požadavek není splněn, musí být provedeno přímé propojení se zpětným obvodem. V takovémto případě nesmí být vodič PE připojen na neživé části zařízení. [9]

5 PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole jsou popsány obecné podklady, které jsou potřebné pro výpočet nebezpečných elektromagnetických vlivů střídavé soustavy 25kV, 50 Hz. Konkrétní parametry pro stanovení nebezpečných elektromagnetických vlivů, pomocí kterých byl prováděn vzorový výpočet, budou obsaženy v kapitole 5.3.

5.1 Specifikace vlivu napájení drah na inženýrské sítě

V první části podkapitoly jsou popsány základní údaje, které jsou nutné při výpočtu nebezpečných vlivů. Druhá část obsahuje popis výpočtů jednotlivých specifických parametrů nebezpečných elektromagnetických vlivů.

5.1.1 Základní údaje

Tato podkapitola obsahuje detailní popis jednotlivých údajů nezbytných pro výpočet nebezpečných vlivů.

Vymezení oblasti o souběhu

Údaje o oblasti a délce souběhu trakčního vedení se zabezpečovacím nebo sdělovacím vedením jsou stanoveny na základě geodetického zaměření stávajícího stavu trakčního vedení a trasy kabelu zabezpečovacího (sdělovacího) vedení. Na základě požadavků příslušných orgánů je stanoveno, zda konkrétní výpočty budou realizovány na stávající stav kabelového vedení, anebo na stav výhledový. Po získání těchto údajů je vypracováno situační schéma, které je podkladem pro konkrétní výpočty.

Údaje o zabezpečovacím nebo sdělovacím vedením

Tyto údaje se skládají z určení, zda se jedná o kabel místní, nebo dálkový. Mezi další údaje řadíme např. typ kabelu, průměr kabelu, materiál pláště atd. V této práci jsou počítány vlivy pouze pro kabel zabezpečovacího vedení, pro sdělovací vedení výpočty prováděny nebyly z důvodu použití optických kabelů ve zvoleném úseku, na které elektromagnetické vlivy nepůsobí.

Údaje o trakčním vedení a zařízení

Podklady k trakčnímu vedení obsahují

- způsob napájení trakčního vedení (jednostranné, dvoustranné atd.),
- typ napěťové soustavy (střídavá soustava),
- proud dodávaný napájecími stanicemi,
- počet lokomotiv v jednom napájecím úseku.

Měrná vodivost půdy

Hodnotu měrné vodivosti půdy můžeme získat pomocí měření, což nám umožňuje dosažení přesnějšího výpočtu, ale pro orientační měření stačí tabulkové hodnoty, ze kterých je vycházeno i v této práci.

Redukční činitel pláště

Redukční činitel pláště je důležitou hodnotou zohledňovanou při výpočtech vlivů a můžeme ho rozdělit do 3 skupin, které jsou popsány níže.

➤ **Kabely s nízkým redukčním činitelem**

Do této skupiny patří všechny kabely s hliníkovým pláštěm, nebo také kabely u nichž byl odpor pláště zmenšen pomocí přídavných vodičů. Redukční činitel těchto kabelů je při kmitočtu 50 Hz v rozmezí 0,023–0,03. Pancíř i plášť těchto kabelů musí být chráněn před korozními účinky prostředí souvislou vrstvou z plastických hmot. Díky tomu je však kabel oddělen od země, a aby byl zachován optimální redukční účinek, je třeba jej uzemnit v předem určených místech. Tyto kabely se používají v oblastech, kde nebezpečný a rušivý vliv střídavé trakce je silný, tedy při dlouhých a těsných souběžích. [6]

➤ **Kabely se středním redukčním činitelem**

Do této skupiny patří veškeré kabely s běžným pancířem a olověným pláštěm. Jejich redukční činitel má pro kmitočet 50 Hz hodnotu v rozmezí 0,24–0,89. Tyto kabely mohou být opatřeny souvislou vrstvou z plastických hmot, díky které omezují účinky korozivních vlivů prostředí (kdy je třeba jejich pláště v určitých místech uzemnit). Použití těchto kabelů je vhodné zejména tam, kde rušivý a nebezpečný vliv střídavé trakce není příliš velký. [6]

Pokud u nich redukována napětí nepřekračují přípustnou mez, je nutné opatřit je vhodnou ochranou např. použitím nadložních lan. [6]

➤ **Kabely s vysokým redukčním činitelem**

K této skupině patří kabely s kovovým pláštěm (hliníkovým nebo olověným) bez ochranného pancíře a také kabely celoplášťové. Redukční činitel těchto kabelů je poměrně vysoký, jelikož reaktivní složka, která je charakteristickou vlastností pancíře, se zde nemůže uplatnit. [6]

Redukční činitel u těchto kabelů nabývá hodnot v rozmezí 0,56–0,97. U kabelů s celoplášťovou izolací, které mají pouze stínící fólii, má redukční činitel hodnotu v rozmezí 0,85–0,97. Zlepšení hodnoty tohoto činitele lze dosáhnout pomocí nosného lana (závěsné kabely), které se potom na obou koncích uzemní. [6]

U kabelu s izolací celoplášťovou lze říci, že vzhledem k vysoké elektrické pevnosti své obvodové izolace je odolný vůči nebezpečným vlivům, avšak rušivý vliv se u tohoto kabelu uplatňuje ve značné míře. [6]

Rozsah výpočetních prací

Rozsah výpočtů nebezpečných indukovaných napětí je primárně zaměřen na zkratový stav a mimořádný havarijní stav trakčního vedení vůči zabezpečovacímu vedení. V opačném případě je nutné do výpočtu zahrnout také výpočet rušivých napětí.

Druh sdělovacího nebo zabezpečovacího vedení	Požaduje se výpočet		
	Nebezpečných elektromagnetických vlivů	Nebezpečných elektrostatických vlivů	Rušivých vlivů
Uložené kabely a závěsné kabely s uzemněným kovovým obalem pro sdělovací zařízení	ANO	NE	ANO*
Nadzemní vedení a závěsné bez kovových uzemněných obalů pro sdělovací zařízení	ANO	Jen při vzdálenosti do 100 m od trakčního vedení	ANO*
Úložné dálkové kabely pro traťové a dálkové zabezpečovací zařízení	ANO	NE	NE
Úložné kabely pro staniční zabezpečovací zařízení bez i s kovovými obaly	Jen při délkách přes 500 m	NE	NE
* U vř kanálů a místních telefonních spojů ČD na nadzemních a kabelových vedeních zpravidla není nutno kontrolovat rušivé vlivy.			

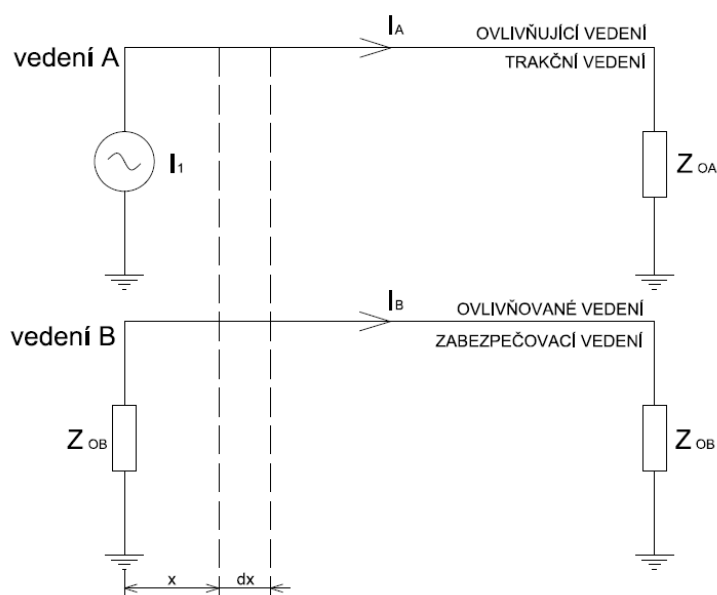
Tabulka 4 - Tabulka výpočtů (převzato a upraveno z [10])

Tabulka č. 4 stanovuje podmínky, podle kterých volíme jednotlivé typy výpočtů pro nebezpečné, či rušivé vlivy.

5.2 Postup výpočtu

V této části práce jsou popsány jednotlivé použité vzorce při výpočtu nebezpečných vlivů na zabezpečovací zařízení. V následující kapitole bude proveden výpočet pro 2 varianty souběhu trakčního vedení a zabezpečovacího vedení. V první variantě je výpočet pro nebezpečné vlivy působící na vedlejší neelektrizovanou trať, podél které vede trasa zabezpečovacího vedení a která je z části souběžná s elektrizovanou tratí. Ve druhém případě vede kabelová trasa zabezpečovacího vedení souběžně s elektrizovanou tratí. Podrobnější popis zabezpečovacích vedení a parametrů počítaného úseku viz kapitola 5.3.

Základní zapojení

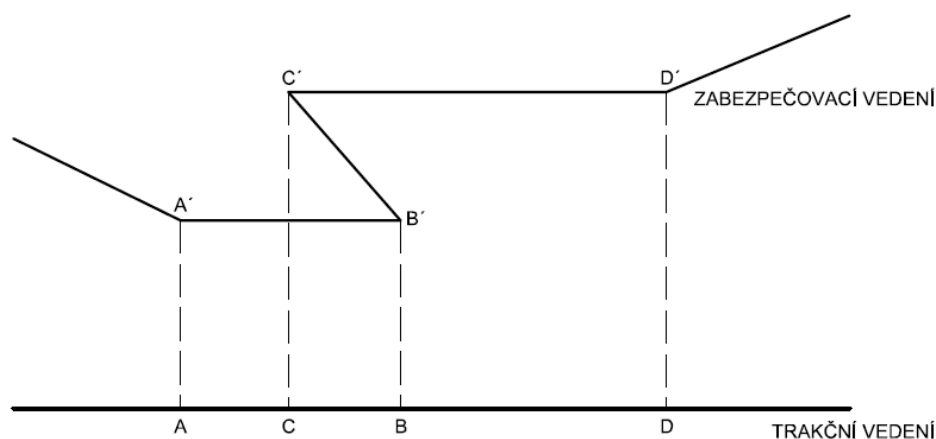


Obrázek 13 - Základní schéma souběhu jednotlivých vedení (převzato a upraveno z [6])

Ze zdroje v našem případě napájecí stanice, která dodává napětí $U_A = 25 \text{ kV}$, 50 Hz protéká v jednofázovém trakčním vedení (okruh A) elektrický proud I_A do zátěže Z_{OA} . Zátěž Z_{OA} je rovna vlnové impedanci vedení, jelikož jsou použita zpětná vedení v zemi. Souběžně s okruhem A (ovlivňující vedení) vede okruh B (ovlivňované vedení), který se skládá z jednovodičového vedení, jenž je na obou koncích spojen se zemí pomocí Z_{OB} . Vlivem protékajícího proudu I_{OA} v okruhu A, dochází k vytváření elektromagnetického a elektrostatického pole ve vedení. Toto pole působí na okruh B tím, že indukuje na délce dx vodiče v okruhu B proud a napětí, což způsobuje vznik nebezpečných nebo rušivých vlivů.

Určení výpočetních úseků souběhu

Mezi trakčním vedením a zabezpečovacím vedením dochází k obecnému či šikmému souběhu jednotlivých vedení. Při obecném souběhu zabezpečovacích nebo sdělovacích vedení s trakčním vedením rozdělíme jednotlivá zabezpečovací vedení do výpočetních úseků. Základní podmínkou pro určení výpočetních úseků musí být jednotné podmínky na základě kterých jsou provedeny výpočty rušivých a nebezpečných vlivů. Mezi základní podmínky řadíme stejný typ sdělovacího nebo zabezpečovacího vedení, stejné redukční činitele kolejí, stejná sousední vedení. Délka výpočetního úseku se rovná kolmému průmětu zabezpečovacího nebo sdělovacího vedení do osy železničních kolejí. Vzdálenosti jednotlivých kolmých průmětů, které slouží jako podklady pro výpočet v této práci, byly naměřeny v CAD programu Microstation V8i.



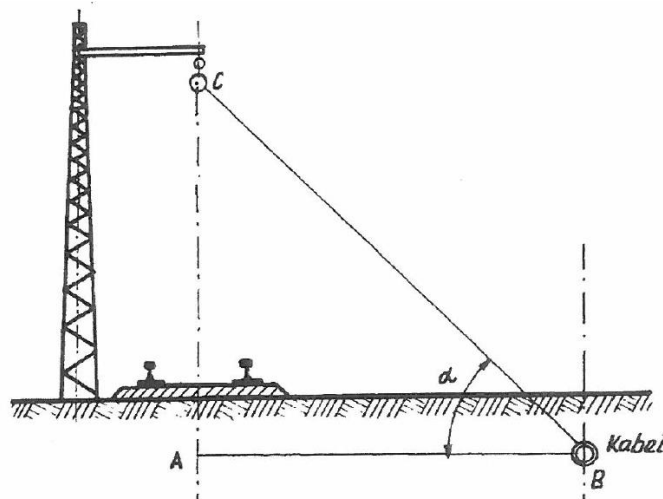
Obrázek 14 – Půdorysné schéma obecného a šikmého souběhu (převzato a upraveno z [10])

Dle Obr. 14 vypočteme délku souběhu

$$L = \overline{AB} - \overline{BC} + \overline{CD} \quad [9.0]$$

Vzdálenost mezi zabezpečovacím nebo sdělovacím vedením a trolejovým vedením

Určuje se jako vzdálenost v metrech mezi svislicemi, které procházejí osami obou těchto vedení a jsou měřena v rovině kolmé k ose trolejového vedení. Pokud je úhel α mezi stranami AB a BC viz Obr. 15 větší než 30° , potom vzdálenost mezi vedeními je dána délkou strany BC a určí se z výrazu [9.1]. [10]

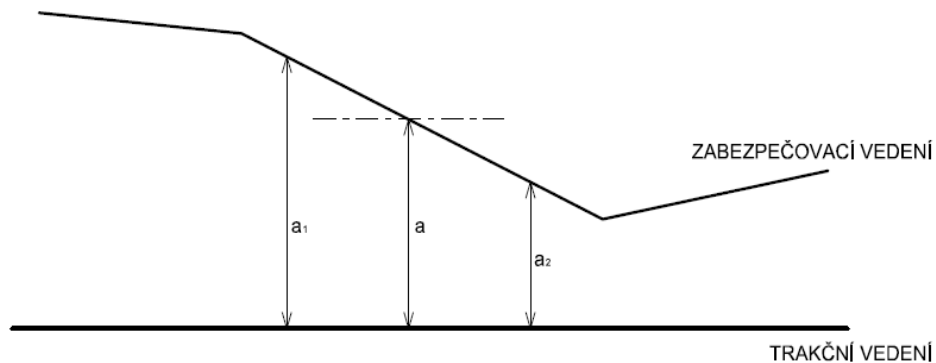


Obrázek 15 - Schéma vzdáleností zabezpečovacího a trakčního vedení. [10]

$$a = \overline{BC} = \frac{\overline{AB}}{\cos\alpha} = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{AC}^2} \quad [9.1]$$

Výpočet šikmého souběhu s trakčním vedením

Při šikmém souběhu zabezpečovacího nebo sdělovacího vedení s trakčním vedením určíme hodnotu šikmého souběhu (a) v metrech jako aritmetický průměr, který spočítáme ze vzdálenosti začátku souběhu a_1 a konce souběhu a_2 zabezpečovacího nebo sdělovacího vedení vzdáleného od osy trakčního vedení viz Obr. 16. [10]



Obrázek 16 – Půdorysné schéma šikmého souběhu

Aritmetický průměr vzdáleností a_1 a a_2 získáme ze vztahu [19]

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad [9.2]$$

Pro ověření, zda byly jednotlivé úseky šikmého souběhu rozděleny na vhodné části, musí být splněna podmínka [19]

$$0,5 \leq \frac{a_1}{a_2} \leq 2 \quad [9.3]$$

Pokud tato podmínka není splněna, došlo k rozdělení jednotlivých úseků šikmého souběhu na příliš velké úseky, a proto je nutné rozdělení na úseky menší.

Výpočet vzájemné indukčnosti M

Pro výpočet vzájemné indukčnosti musíme nejprve stanovit hodnotu parametru x . [19]

$$x = 0,00281 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{f}{\sigma}} \quad [9.4]$$

kde a je vzájemná vzdálenost obou okruhů [m]

f je kmitočet proudu [Hz]

σ je zdánlivý měrný odpor půdy [$\Omega \cdot m$] [19]

Pro hodnoty parametru $x \leq 0,1$ platí pro indukčnost M v $\mu H \cdot km^{-1}$

$$M = \frac{\mu_o}{4\pi} \left(2 \ln \frac{2}{qa\alpha} + 1 - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^9 \quad [9.5]$$

Kde μ_o je permeabilita země: $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H.m⁻¹]

a je vodorovná vzdálenost od indukujícího okruhu [m]

q je 1,7811

f je kmitočet proudu [Hz]

$\alpha = x$ [19]

Po vypočítání parametru x lze hodnotu vzájemné indukčnosti odečíst z tabulek obsažených v normě ČSN 33 2160. Další možností je výpočet dle vzorce [9.5]

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při mimořádném stavu

Při výpočtu indukovaného elektromotorického napětí se dosazuje při mimořádném stavu za indukující proud I hodnota tzv. ekvivalentního trakčního proudu I_{ekv} . Pod pojmem ekvivalentní trakční proud rozumíme proud, který má stejný indukční účinek jako proudy rozdělené v trakčním vedení podle skutečného zatížení. [6]

Hodnotu ekvivalentního trakčního proudu lze určit ze vztahu

$$I_{ekv} = I_{celk} \cdot k \quad [9.6]$$

kde I_{celk} je výsledný trakční proud výpočetního trakčního úseku při mimořádném stavu trakčního vedení [A]

k je koeficient pro výpočet ekvivalentního trakčního proudu dle počtu lokomotiv jedoucích současně ve vyšetřovaném trakčním úseku. [6]

Pak po dosazení I_{ekv} do vzorce [5.0] dostáváme vztah pro výpočet indukovaného elektromotorického napětí

$$U_m = \omega \cdot M \cdot I_{ekv} \cdot l_{ekv} \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [9.7]$$

kde ω je úhlový kmitočet trakčního proudu [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

M je vzájemná indukčnost $\mu\text{H}/\text{km}$

I_{ekv} je ovlivňující proud tekoucí trolejovým vedením v ampérech [A]

r_c je redukční činitel (celkový)

– součin redukčních činitelů kolejnice a zabezpečovacího kabelu.

l_{ekv} je délka souběhu vedení [km] [6]

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při zkratovém stavu

U výpočtu podélného indukovaného elektromotorického napětí při zkratového stavu trakčního vedení vycházíme ze vztahu [5.0], za indukující proud I dosadíme hodnotu zkratového proudu I_z . [6]

Po dosazení zkratového proudu I_z do vzorce [5.0] získáme vztah

$$U_z = \omega \cdot M \cdot I_z \cdot l_k \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [9.8]$$

kde ω je úhlový kmitočet trakčního proudu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

M je vzájemná indukčnost $\mu\text{H}/\text{km}$

I_z je ovlivňující zkratový proud tekoucí trolejovým vedením v ampérech [A]

r_c je redukční činitel (celkový)

– součin redukčních činitelů kolejnice a zabezpečovacího kabelu.

l_k je délka souběhu vedení [km] [6]

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při normálním stavu

Při výpočtu nebezpečných napětí za normálního stavu, se uvažuje fázový součet napětí indukovaného na vodiči zabezpečovacího nebo sdělovacího kabelu elektromagnetickým vlivem trakčního proudu z napájecí stanice. K výpočtu použijeme vzorec [5.0], do kterého dosadíme ekvivalentní hodnotu pracovního proudu I_p . [6]

Po dosazení do vzorce [5.0] získáme vztah

$$U_n = \omega \cdot M \cdot I_p \cdot l_k \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [9.9]$$

kde ω je úhlový kmitočet trakčního proudu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

M je vzájemná indukčnost $\mu\text{H}/\text{km}$

I_p je ovlivňující pracovní proud tekoucí trolejovým vedením v ampérech [A]

r_c je redukční činitel (celkový)

– součin redukčních činitelů kolejnice a zabezpečovacího kabelu.

l_k je délka souběhu vedení [km] [6]

5.3 Vzorový výpočet

Tato kapitola popisuje výpočet nebezpečných vlivů pro konkrétní železniční úsek. Výpočet nebezpečných vlivů je proveden pro střídavou soustavu 25 kV, 50 Hz v napájeném (ovlivňujícím) úseku Častolovice – Rychnov nad Kněžnou – Solnice. Tento traťový úsek vytváří nebezpečné indukované elektromotorické napětí, které působí na ovlivňovaný zabezpečovací kabel neelektrizovaného železničního úseku. Složení neelektrizované trati je z metalických zabezpečovacích kabelů SŽDC, které se nachází v trati Častolovice – Doudleby nad Orlicí – Rokytnice v Orlických horách.

Pro výpočet nebezpečných elektromagnetických vlivů působících na tento traťový úsek byly vytvořeny tabulky v prostředí MS Excel (náhled tabulek viz příloha č.4), které hodnotí vlivy elektrizovaného traťového úseku na neelektrizovaný úsek a jsou součástí této práce. Z důvodu rozsáhlosti výpočtů je v následujících kapitolách proveden pouze vzorový výpočet.

5.3.1 Základní údaje

Výstavba trakčního vedení, které má být ve výhledovém stavu přepnuta na střídavou soustavu 25 kV, 50 Hz může ovlivnit provoz na zabezpečovacích kabelech blízkých a souběžných s trati. Z tohoto důvodu je požadován výpočet v rámci projektové přípravy pro 2 varianty:

- a) Vliv trakčního vedení v úseku Častolovice – Rychnov nad Kněžnou – Solnice na železniční trať Častolovice – Doudleby nad Orlicí – Rokytnice v Orlických horách, která není a ani v dohledné době nebude elektrizována.
- b) Vliv trakčního vedení na kabel zabezpečovacího vedení, které vede souběžně s trakčním vedením v celém úseku Častolovice – Rychnov nad Kněžnou.

Přípustné hranice naindukovaného napětí jsou dané normou ČSN 34 2040, která požaduje, aby vlivem trakčního vedení 25 kV nedošlo k překročení hranice indukovaného napětí ve výši 250 V v zabezpečovacích kabelech.

5.3.2 Parametry výpočtu

Trakční proud při mimořádném stavu $I_m = 1 \text{ kA}$

Trakční proud při zkratovém stavu $I_z = 1 \text{ kA}$

- dle počtu projíždějících lokomotiv.

Redukční činitel kolejí $r_k = 0,9$

- kolej špatně vodivě propojena vlivem svařování kolejnic.

Redukční činitel kabelu (stávající metalický kabel) $r_{kab} = 0,9$

Měrný odpor půdy $\sigma = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$

Doba trvání zkratu $t_z = 0,3 \text{ s}$

5.4 První varianta výpočtu stávajícího kabelu na neelektrizované trati

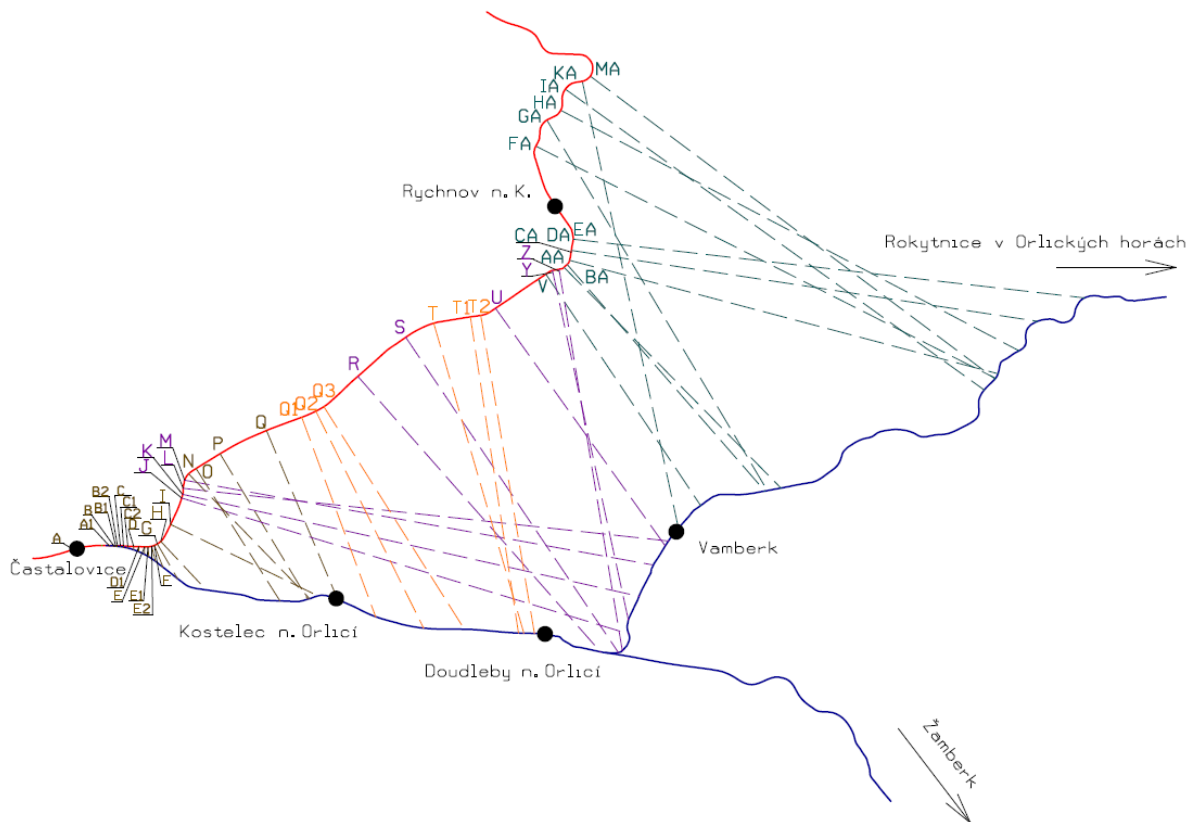
V této kapitole jsou počítány nebezpečné indukující vlivy působící na zabezpečovací metalický kabel, který se nachází v celé délce traťového úseku Častolovice – Rokytnice v Orlických horách.

Parametry výpočtu

Parametry výpočtu jsou stanoveny v kapitole 5.3.2

Situační schéma

Podklady pro výpočet, respektive lichoběžníky, ze kterých jsou odvozeny vzdálenosti indukovaných napětí, charakterizují topologii trakčního vedení vůči kabelům v dotčeném úseku trati. Na základě těchto lichoběžníků, které jsou patrné z Obr. 17 je sestaven model pro výpočet vlivů trakčního vedení.



Obrázek 17 - Situační schéma trati

Výpočet vzdálenosti mezi zabezpečovacím a trakčním vedením

Prvním krokem je výpočet vzdáleností pro počáteční bod úseku A₁ a koncového bodu úseku B jednotlivých vedení, který je proveden dle vztahu [9.1].

Parametry výpočtu:

- Výška trakčního vedení nad temenem kolejnice $y_t = 5,6 \text{ m}$
- Hloubka uložení zabezpečovacího kabelu nad temenem kolejnice $y_k = 0,7 \text{ m}$
- Vzdálenost trakčního vedení a zabezpečovacího vedení bodu A₁ $x_1 = 2,5 \text{ m}$
- Vzdálenost trakčního vedení a zabezpečovacího vedení bodu B $x_2 = 4,2 \text{ m}$

Výpočet vzdáleností bodu A₁

$$A_1 = \sqrt{x_1^2 + (y_t + y_k)^2} \quad [10.1]$$

$$A_1 = \sqrt{2,5^2 + (5,6 + 0,7)^2}$$

$$\mathbf{A_1 = 6,77 m}$$

Výpočet vzdáleností bodu B

$$B = \sqrt{x_2^2 + (y_t + y_k)^2} \quad [10.2]$$

$$B = \sqrt{4,2^2 + (5,6 + 0,7)^2}$$

$$\mathbf{B = 7,57 m}$$

Výpočet šikmého souběhu s trakčním vedením

Jelikož se v tomto úseku nejedná o obecný souběh, ale o souběh šikmý je nutné provést výpočet pro šikmý souběh dle vztahu [9.2]

$$a = \frac{A_1 + B}{2} \quad [10.3]$$

$$a = \frac{6,77 + 7,57}{2}$$

$$\mathbf{a = 7,17 m}$$

Pro ověření, zda byl úsek zvolen správně je nutné splnit podmínku dle upraveného vztahu [9.3]

$$0,5 \leq \frac{A_1}{B} \leq 2 \quad [10.4]$$

$$0,5 \leq \frac{6,77}{7,57} \leq 2 \rightarrow \mathbf{vyhovuje}$$

Výpočet vzájemné indukčnosti M

Stanovení hodnoty vzájemné indukčnosti můžeme provést pomocí výpočtu, nebo odečtením z grafu příloha 1. Níže bude proveden numerický výpočet a poté pro ověření správnosti postupu porovnán s grafem.

Pro výpočet vzájemné indukčnosti stanovíme nejprve hodnotu parametru x dle vztahu [9.4].

$$x = 0,00281 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{f}{\sigma}} \quad [10.5]$$

$$x = 0,00281 \cdot 7,17 \cdot \sqrt{\frac{50}{100}}$$

$$\mathbf{x = 0,010073}$$

Pak výpočet vzájemné indukčnosti získáme ze vztahu [9.5], jelikož je splněna podmínka $x < 1$

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left(2 \ln \frac{2}{qa\alpha} + 1 - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^9 \quad [10.6]$$

Po matematickém zjednodušení získáváme vztah

$$M = 10^{-7} \left(2 \ln \frac{2}{1,7811 \cdot 7,17 \cdot 0,010073} + 1 - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^9$$

$$\mathbf{M = 1056 \mu H}$$

Pro porovnání byly odečteny hodnoty z grafu (přílohy 1), kde $a = 7,17$ m, $\sigma = 100$ Ω .m. Hodnota odečtena z grafu je $1000 \mu H$ což se téměř shoduje s vypočtenou hodnotou, jelikož odchylka mohla být způsobena grafickou podobou daného grafu. Dle porovnání s grafem, bylo ověřeno, že postup výpočtu byl zvolen správně.

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při mimořádném stavu

Nejprve stanovíme hodnotu I_{ekv} dle vztahu [9.6]

kde $k = 1$

$$I_{celk} = 1000 \text{ A}$$

$$I_{ekv} = I_{celk} \cdot k \quad [10.7]$$

$$I_{ekv} = 1000 \cdot 1$$

$$I_{ekv} = \mathbf{1000 \text{ A}}$$

Dále je nutné spočítat celkový redukční činitel r_c , který získáme ze vztahu

$$r_c = r_k \cdot r_{kab} \quad [10.8]$$

$$r_c = 0,9 \cdot 0,9$$

$$r_c = \mathbf{0,81}$$

Pak výpočet indukovaného napětí při mimořádném stavu trakčního vedení dle vztahu [9.7]

kde $l_{ekv} = 0,070 \text{ km}$

$$U_m = \omega \cdot M \cdot I_{ekv} \cdot l_{ekv} \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [10.9]$$

$$U_m = 314 \cdot 0,001056 \cdot 1000 \cdot 0,070 \cdot 0,81$$

$$U_m = \mathbf{18,81 \text{ V}}$$

kde ω je úhlový kmitočet trakčního proudu [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

M je vzájemná indukčnost $\mu\text{H}/\text{km}$

I_{ekv} je ovlivňující proud tekoucí trolejovým vedením v ampérech [A]

r_c je redukční činitel (celkový)

– součin redukčních činitelů kolejnice a zabezpečovacího kabelu.

l_{ekv} je délka souběhu vedení [km]

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při zkratovém stavu

Výpočet indukovaného napětí při zkratovém stavu je provedené dle vztahu [9.8]

kde $I_z = 1000$ A

$$U_z = \omega \cdot M \cdot I_z \cdot l_k \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [11.0]$$

$$U_z = 314 \cdot 0,001056 \cdot 1000 \cdot 0,070 \cdot 0,81$$

$$U_z = \mathbf{18,81 V}$$

kde ω je úhlový kmitočet trakčního proudu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

M je vzájemná indukčnost $\mu\text{H}/\text{km}$

I_z je ovlivňující zkratový proud tekoucí trolejovým vedením v ampérech [A]

r_c je redukční činitel (celkový)

– součin redukčních činitelů kolejnice a zabezpečovacího kabelu.

l_k je délka souběhu vedení [km]

Tento postup výpočtu je aplikován v celém traťovém úseku a výsledné hodnoty indukovaných napětí jsou sečteny tak, aby došlo k vyhodnocení indukovaných napětí v celém traťovém úseku.

V úseku Častolovice – Kostelec nad Orlicí je výsledné indukované napětí při mimořádném i zkratovém stavu **316 V**.

Vypočítané napětí je porovnáno s tabulkou dle ČSN 34 2040 viz příloha č.2. Z tabulky je patrné, že se jedná o dálkový kabel bez translátorů a bez výstrahy OPDN (ochrana před nebezpečným dotykovým napětím). V takovémto případě se tabulka v příloze č. 2 odkazuje na tabulku č. 14, která je v této práci označena jako tab. 5.

Na základě doby zkratu $t_z = 0,3$ s byla porovnána zjištěná hodnota indukovaného napětí na vodiči zabezpečovacího vedení s tabulkou 5. Při porovnání je patrné, že výsledná hodnota **316 V** v úseku Častolovice – Kostelec nad Orlicí **nevyhovuje** výhledovým parametrům.

Doby trvání zkratu	Mez nebezpečného napětí
s	V
do 0,3	300
0,4	260
0,5	230
0,6	210
0,7	190
0,8	180
0,9	170
1	160

Tabulka 5 - Tabulka 14 normy ČSN 34 2040 (převzato a upraveno z [19])

Nejjednodušším opatřením je nahradit stávající kabel zabezpečovacího zařízení novějším typem kabelu s lepším stíněním tedy nižším redukčním činitelem. V kapitole 5.5 je proveden výpočet nebezpečných vlivů pro navrhovaný kabel.

5.5 První varianta výpočtu navrhovaného kabelu na neelektrizované trati

Ke snížení působení nebezpečného indukovaného napětí se jeví použití kabelu typu TCEKPFLEZE, u kterého se pohybuje redukční činitel v rozmezí 0,05–0,4.



Obrázek 18 - Kabel typu TCEKPFLEZE [16]

Parametry výpočtu

Parametry výpočtu jsou totožné jako v kapitole 5.3.2, pouze s rozdílem použitého redukčního činitele navrhovaného kabelu.

Redukční činitel kabelu (navrhovaný kabel s Al drátovým armováním)

$$\Gamma_{\text{kabn}} = 0,4$$

Při výpočtu je postupováno totožně jako u stávajícího kabelu, pouze u výpočtu indukovaného mimořádného a zkratového napětí je dosazen do vztahu [9.7]

Celkový redukční činitel r_c ,

$$r_c = r_k \cdot r_{kavn} \quad [11.1]$$

$$r_c = 0,9 \cdot 0,4$$

$$r_c = \mathbf{0,36}$$

Pak výpočet indukovaného napětí při mimořádném stavu trakčního vedení dle vztahu [9.7] pro navrhovaný kabel

kde $l_{ekv} = 0,070$ km

$$U_m = \omega \cdot M \cdot I_{ekv} \cdot l_{ekv} \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [11.2]$$

$$U_m = 314 \cdot 0,001056 \cdot 1000 \cdot 0,070 \cdot 0,36$$

$$U_m = \mathbf{8,35 V}$$

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při zkratovém stavu

Výpočet indukovaného napětí při zkratovém stavu je provedené dle vztahu [9.8]

kde $I_z = 1000$ A

$$U_z = \omega \cdot M \cdot I_z \cdot l_k \cdot r_c \cdot 10^{-3} \quad [11.3]$$

$$U_z = 314 \cdot 0,001056 \cdot 1000 \cdot 0,070 \cdot 0,36$$

$$U_z = \mathbf{8,35 V}$$

Dle výpočtu dosahujeme při použití kabelu TCEKPFLEZE výsledného celkového indukujícího mimořádného i zkratového napětí na kabelu zabezpečovacího vedení **140 V**. Při porovnání s tabulkou 5 již meze nebezpečných napětí nepřekračujeme a kabelizace v celém traťovém úseku **vyhovuje** výhledovému stavu.

Navazující traťové úseky Kostelec nad Orlicí – Doudleby nad Orlicí – Rokytnice v Orlických horách byly počítány pouze v programu MS Excel (náhled tabulek viz příloha č.4) a jsou součástí této práce na přiloženém CD. Na základě velké vzdálenosti mezi jednotlivými traťovými úseky elektrizované a neelektrizované tratě Kostelec nad Orlicí – Doudleby nad Orlicí – Rokytnice v Orlických horách **vyhovují** stávající kabely tohoto úseku pro výhledový stav a není proto nutné měnit stávající kabeláž.

5.6 Druhá varianta výpočtu stávajícího kabelu na elektrizované trati

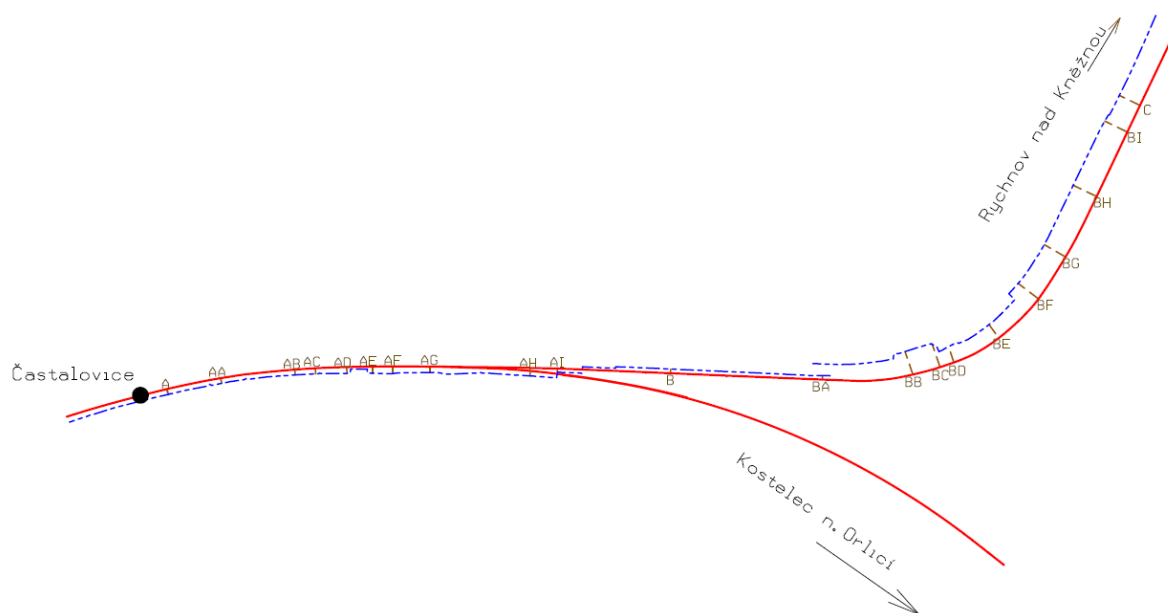
Druhá část výpočtů je prováděna pro stávající zabezpečovací kabel, který vede souběžně s elektrizovaným traťovým úsekem Častolovice – Rychnov nad Kněžnou. Podklady k výpočtům jsou totožné jako v kapitolách 5.1 a 5.3.1

Parametry výpočtu

Parametry výpočtu jsou popsány v kapitole 5.3.2.

Situační schéma

Podklady pro výpočet, respektive lichoběžníky, ze kterých jsou odvozeny vzdálenosti indukovaných napětí, charakterizují topologii trakčního vedení vůči kabelům v dotčeném úseku trati. Na základě těchto lichoběžníků, které jsou patrné z Obr. 19 je sestaven model pro výpočet vlivů trakčního vedení.



Obrázek 19 - Situační schéma souběžného kabelu

Postup výpočtu

Postup výpočtu je totožný s výpočtem dle kapitoly 5.4, tudíž duplicitní numerický výpočet v této kapitole není uveden. Výpočty byly provedeny v programu MS Excel (náhled tabulek viz příloha č.5) a jsou součástí této práce na přiloženém CD. Uvedeny budou až výsledné hodnoty nebezpečných indukovaných napětí pro kabel vedoucí souběžně s traťovým úsekem Častolovice – Rychnov nad Kněžnou a následně popsána vhodná opatření proti indukujícím vlivům.

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při mimořádném i zkratovém stavu

Výsledná hodnota indukovaného napětí na kabelech zabezpečovacího vedení při mimořádném i zkratovém stavu činí v celém traťovém úseku Častolovice – Rychnov nad Kněžnou **2,1 kV**.

Vypočítané indukované napětí je porovnáno s tabulkou dle ČSN 34 2040 viz příloha č.2. Z tabulky je patrné, že se jedná o dálkový kabel bez translátorů a bez výstrahy OPDN (ochrana před nebezpečným dotykovým napětím). V takovémto případě se tabulka v příloze č. 2 odkazuje na tabulku č. 14, která je v této práci označena jako tabulka 5.

Na základě doby zkratu $t_z = 0,3$ s byla porovnána zjištěná hodnota indukovaného napětí na vodiči zabezpečovacího vedení s tabulkou 5. Při porovnání je zjištěno, že výsledná hodnota indukovaného napětí **2,1 kV** v úseku Častolovice – Rychnov nad Kněžnou **nevyhovuje** výhledovým parametrům.

Nejjednodušším opatřením je nahradit stávající kabel zabezpečovacího zařízení novějším typem kabelu s lepším stíněním tedy nižším redukčním činitelem. Dále pokud to podmínky umožní posunutí trasy kabelu od osy trakčního vedení. V kapitole 5.5 je proveden výpočet nebezpečných vlivů pro navrhovaný kabel se sníženým redukčním činitelem kabelu i kolejí.

5.7 Druhá varianta výpočtu navrhovaného kabelu na elektrizované trati

Pro snížení dopadu působnosti nebezpečných indukovaných napětí lze doporučit použití kabelu typu TCEKPFLEZE, u kterého se pohybuje redukční činitel v rozmezí 0,05–0,4. Pomocí toho typu kabelu lze snížit hodnotu indukovaných napětí na mez, která vyhovuje výhledovému stavu traťového úseku.

Postup výpočtu

Postup výpočtu je totožný s výpočtem dle kapitoly 5.5, tudíž duplicitní numerický výpočet v této kapitole není uveden. Pro výpočty byly vytvořeny tabulky v prostředí MS Excel (náhled tabulek viz příloha č.5) a jsou součástí této práce na přiloženém CD. Uvedeny budou až výsledné hodnoty nebezpečných indukovaných napětí pro navrhovaný kabel vedoucí souběžně s elektrizovaným traťovým úsekem Častolovice – Rychnov nad Kněžnou

Parametry výpočtu

Parametry výpočtu jsou stejné jako v kapitole 5.3.2, pouze s rozdílem použitého navrhovaného redukčního činitele kabelu a kolejí.

Redukční činitel výhledových kolejí $\Gamma_k = 0,6$

- kolej vodivě propojena na základě modernizace železničního svršku.

Redukční činitel kabelu (navrhovaný kabel s Al drátovým armováním) $\Gamma_{kabl} = 0,1$

Výpočet indukovaného elektromotorického napětí při mimořádném i zkratovém stavu

Použitím kabelu popsaného v kapitole 5.5 lze výrazně snížit působení nebezpečných indukovaných napětí na zabezpečovací vedení. Výpočet je opět totožný s výpočtem výše, tudíž je uvedena pouze hodnota výsledného indukovaného napětí při mimořádném a zkratovém stavu. Na základě použití kabelu typu TCEKPFLEZE dosahuje celková hodnota indukovaného mimořádného i zkratového napětí v celém traťovém úseku **155 V**.

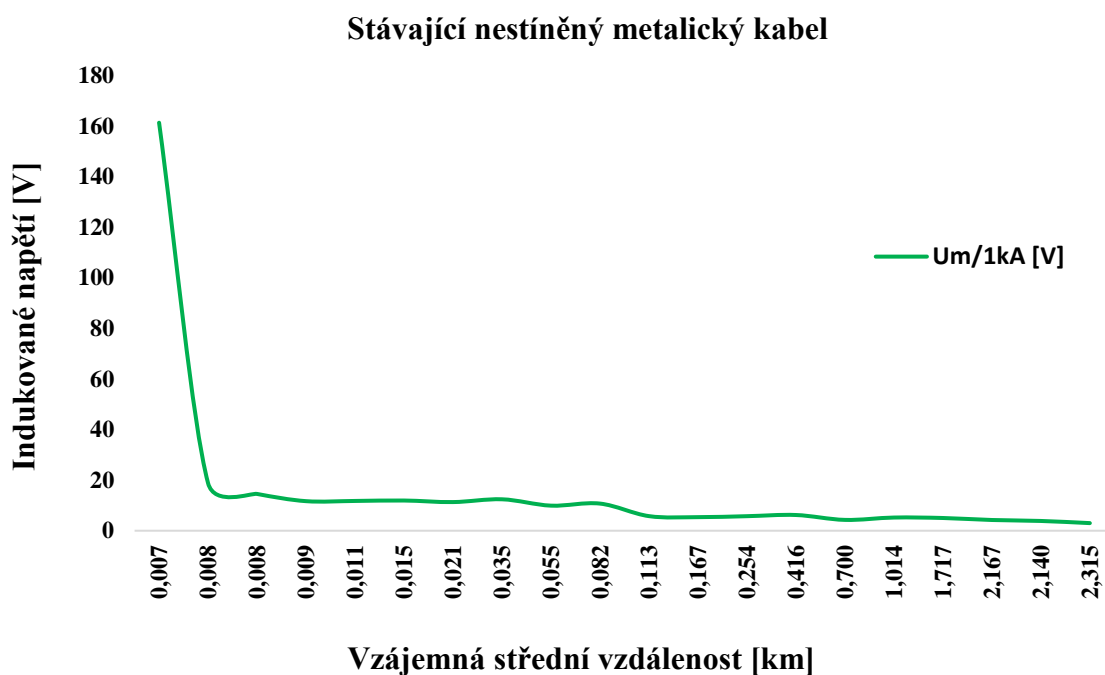
Po dobu zkratu $t_z = 0,3$ s byla porovnána zjištěná hodnota indukovaných napětí na vodiči zabezpečovacího vedení s tabulkou 5. Při porovnání je zjištěno, že výsledná hodnota indukovaného napětí **155 V** v úseku Častolovice – Rychnov nad Kněžnou **vyhovuje** výhledovým parametrům.

5.8 Výsledky a diskuze

Dle provedených výpočtů bylo zjištěno, že při přechodu na střídavou trakční soustavu 25 kV, 50 Hz, dojde v obou variantách výpočtu k naindukování nebezpečných napětí do stávajících metalických kabelů o hodnotách, které nevyhovují stanoveným požadavkům. Z tohoto důvodu bude nutná výměna stávající zabezpečovací kabeláže.

Stávající kabel na neelektrizované trati Častolovice – Rokytnice v Orlických horách

Lze konstatovat, že ze sledovaného úseku trati Častolovice – Rokytnice v Orlických horách je jediný problematický úsek Častolovice – Kostelec nad Orlicí. V tomto úseku dochází k těsnému souběhu trakčního vedení s tratí, což způsobuje, že v případě přechodu na střídavou soustavu 25 kV, 50 Hz, dojde k naindukování nebezpečného napětí do stávajícího metalického kabelu viz graf 1.



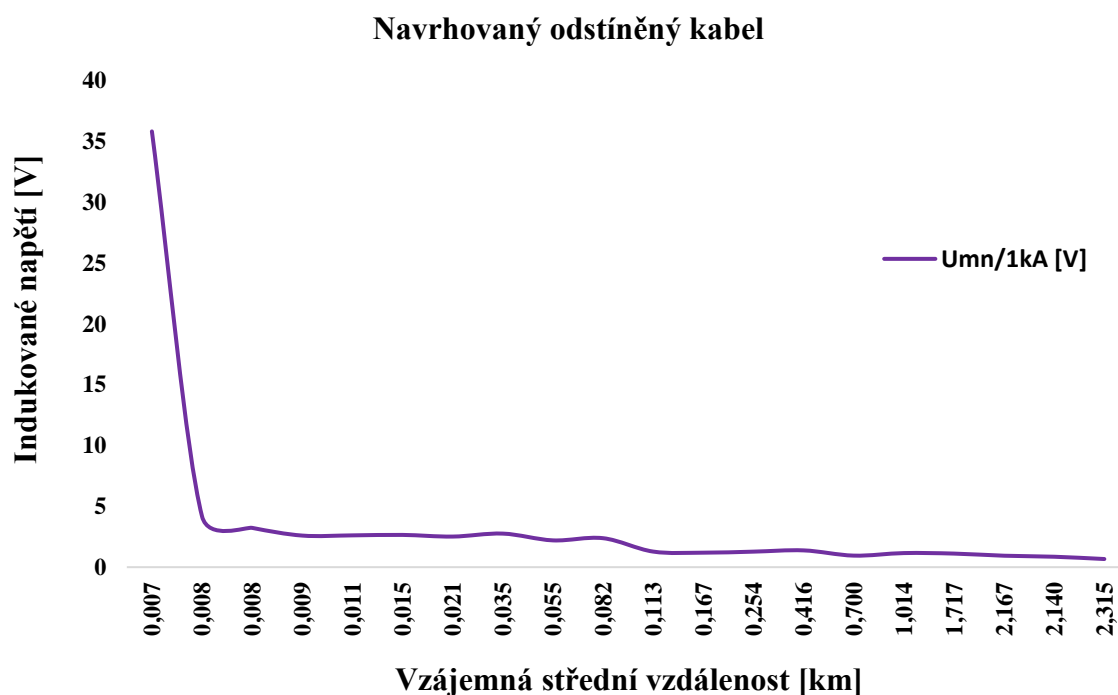
Graf 1 - Indukující napětí ve stávajícím kabelu

Celková hodnota indukovaného napětí v úseku Častolovice – Kostelec nad Orlicí činí **316 V**, což nespĺňuje daná kritéria, a stávající kabel nespĺňuje podmínky pro přechod na střídavou soustavu 25 kV, 50 Hz.

Ve zbylém úseku Kostelec nad Orlicí – Doudleby nad Orlicí – Rokytnice v Orlických horách dochází k naindukování napětí řádově v jednotkách voltů, a tudíž tento úsek vyhovuje podmínkám přechodu na střídavou trakční soustavu, a není nutné se jím z hlediska působení nebezpečných vlivů zabývat.

Navrhovaný kabel na neelektrizované trati Častolovice – Rokytnice v Orlických horách

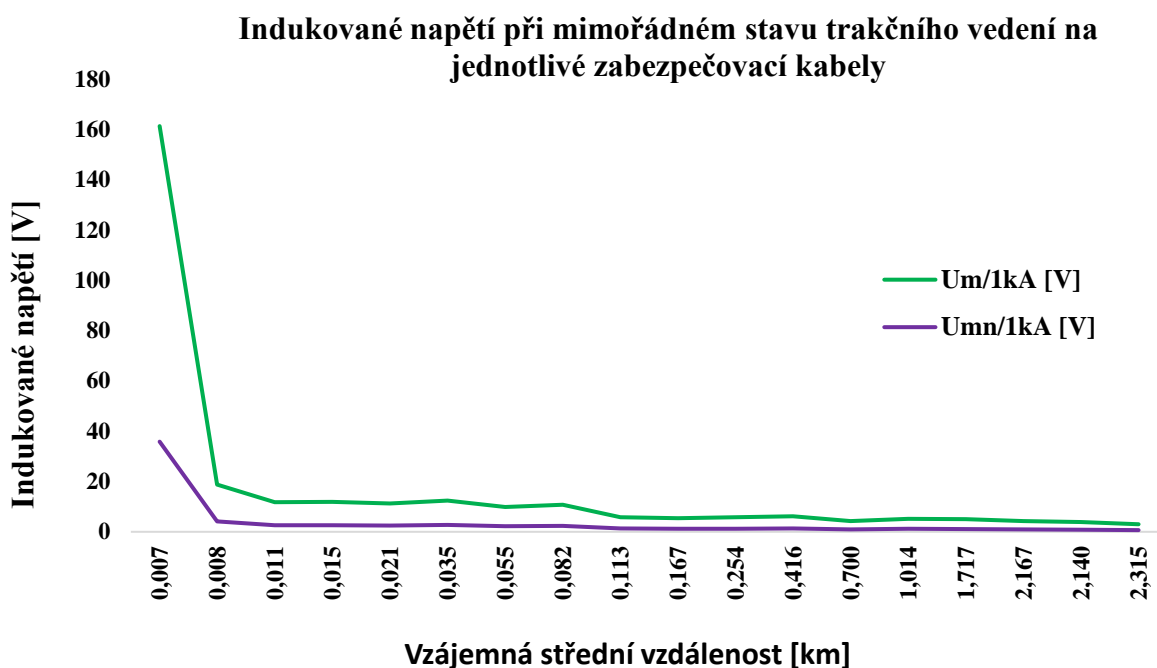
Pro splnění podmínek přechodu na střídavou trakční soustavu 25 kV, 50 Hz byl navržen novější typ kabelu, který dosahuje celkového indukovaného napětí řádech desítek voltů viz graf 2. Toto tvrzení bylo ověřeno výpočtem, a kabel tedy splňuje podmínky přechodu na střídavou trakční soustavu 25 kV, 50 Hz, a zajistí tak bezpečný provoz zabezpečovacího zařízení.



Graf 2 - Indukované napětí v navrhovaném kabelu

Porovnání stávajícího a navrhovaného kabelu

Při vzájemném porovnání obou kabelů znázorněných na grafu 3, lze spatřit značný rozdíl v naindukovaném napětí do jednotlivých kabelů. Tento výrazný rozdíl je způsoben stínícími prvky, které jsou obsaženy v jednotlivých vrstvách navrhovaného kabelu, a díky tomu i při působení napětí o hodnotě 25 kV umožňuje kabel činnost zabezpečovacích zařízení bez rizika vzniku nežádoucích vlivů na zabezpečovací vedení.



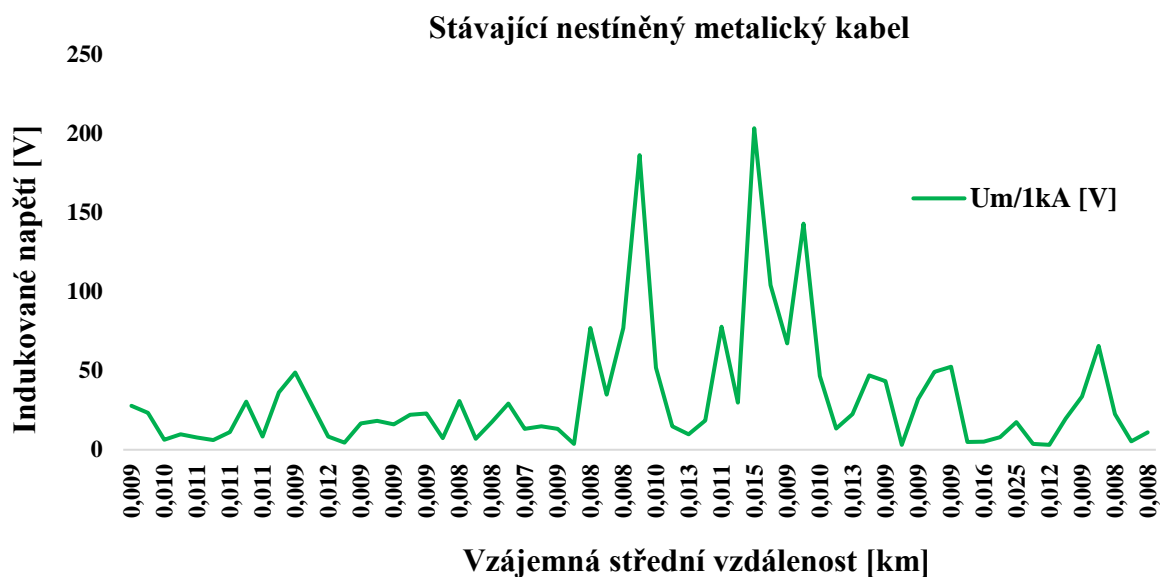
Graf 3 - Porovnání indukovaného napětí zabezpečovacích kabelů neelektrizované trati

Dle výpočtů při přechodu na napájení trakční sítě střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz, není nutná výměna kabelu zabezpečovacího vedení v celém úseku Častolovice – Rokytnice v Orlických horách. Výměna kabelu je nutná pouze v úseku Častolovice – Kostelec nad Orlicí, díky čemuž dojde k výraznému snížení stavebních nákladů a omezení z nich plynoucí.

Souběžný stávající kabel na elektrizované trati Častolovice – Rychnov nad Kněžnou

V případě přechodu na střídavou trakční soustavu 25 kV, 50 Hz, je stávající kabel, který vede souběžně s tratí, vlivem těsného souběhu v celé délce trati vystaven vysokým hodnotám indukovaného napětí. V grafu 4 je vidět průběh indukovaného napětí v celé délce vyšetřovaného úseku, které v součtu dosahují **2,1 kV**.

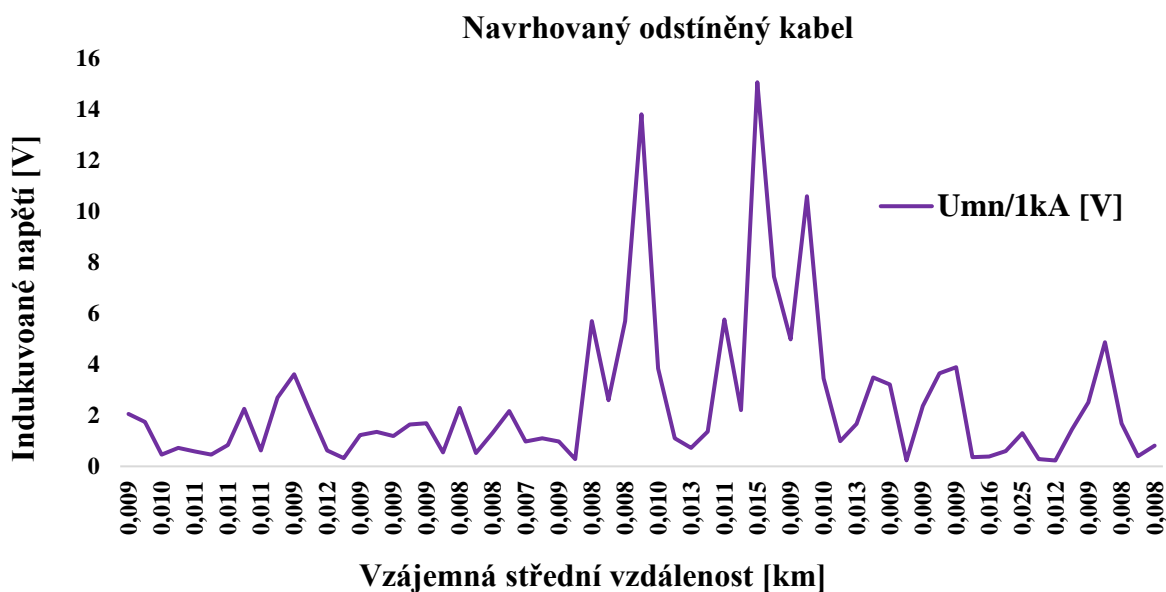
Tato hodnota je zcela nevyhovující a v případě přechodu by docházelo k narušení provozu zabezpečovacího zařízení.



Graf 4 - Indukované napětí ve stávajícím zabezpečovacím kabelu elektrizované trati

Navrhovaný kabel na trati Častolovice – Rychnov nad Kněžnou

Z důvodu vysokých hodnot indukovaného napětí do stávajícího kabelu je navrhováno opatření v podobě kabelu s lepším stíněním, díky čemuž dosáhneme výrazného poklesu indukovaného napětí, viz graf 5.

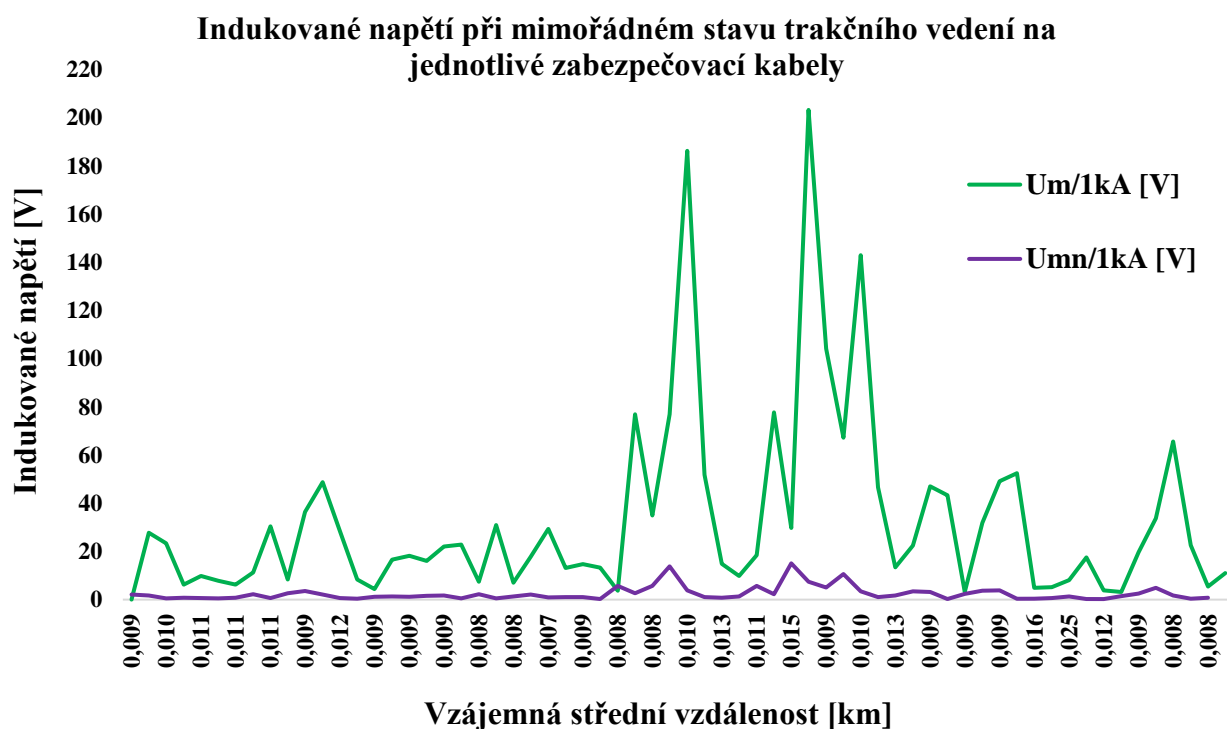


Graf 5 - Indukované napětí v navrhovaném zabezpečovacím kabelu elektrizované trati

Dalším prvkem, který se podílí na snížení indukovaného napětí, je vodivé propojení kolejnic, které bude realizováno při výměně železničního svršku. Díky tomu se podařilo snížit hodnotu indukovaného napětí na **155 V**, a tedy splnění podmínek pro přechod na napájení trakční sítě střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz.

Porovnání stávajícího a navrhovaného kabelu

Z grafu 6 lze vyčíst rozdíl indukovaného napětí na stávajícím a navrhovaném kabelu zabezpečovacího vedení. V případě přechodu na střídavou soustavu 25 kV, 50 Hz, by docházelo u stávajícího metalického kabelu k velkému riziku funkčnosti zabezpečovacího zařízení vlivem nebezpečného indukovaného napětí na metalickém kabelu. Proto je v tomto případě nutná kompletní výměna stávajícího metalického kabelu v celé délce úseku za nový typ zabezpečovacího kabelu, který je v této práci navržen, a tím zajistit bezpečný provoz zabezpečovacího zařízení.



Graf 6 - Porovnání indukovaného napětí zabezpečovacích kabelů neelektrizované trati

6 ZÁVĚR

V rámci modernizace dopravní infrastruktury je uvažována jednotná napájecí soustava v podobě střídavé soustavy 25 kV, 50 Hz, a tím i hrozící nebezpečí v podobě vzniku nebezpečných či rušivých napětí v zabezpečovacích nebo sdělovacích zařízeních. Tato napětí mohou poruchově působit na stávající kabelová vedení ležící v těsné blízkosti trakčního vedení.

Diplomová práce je zaměřena na řešení problematiky indukovaného nebezpečného a rušivého napětí působícího na inženýrské sítě v podobě zabezpečovacích nebo sdělovacích kabelů při přechodu na střídavou trakční soustavu 25 kV, 50 Hz. Případné bludné proudy vznikající vybočením ze zpětné cesty trakčního proudu střídavé soustavy nemají tak destruktivní účinky na kovové konstrukce a zařízení umístěná v zemi jako u soustavy stejnosměrné. Výraznějším negativem, které je nutno řešit je vznik indukovaného napětí ve vodivých objektech souběžně s tratí elektrizovanou střídavou soustavou.

Projekčními výpočty bylo ověřeno, že v místech, kde dochází k těsnému souběhu zabezpečovacích kabelů s trakčním vedením napájeným střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz je nutné provádět vyhodnocení elektromagnetické kompatibility mezi těmito kabelovými vedeními a trakčním vedením.

Z tohoto důvodu lze výpočty nebezpečných nebo rušivých napětí v kabelech jednotlivých vedení považovat za důležitou část realizace projektové dokumentace. Správné vyhodnocení těchto vlivů má dopad na bezpečný provoz železničních zabezpečovacích nebo sdělovacích zařízení a zanedbání těchto vlivů může mít za následek poruchový stav těchto zařízení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HORÁK, Karel. *Energetika a trakce*. Bratislava: Alfa, 1983.
- [2] JANSA, František. *Elektrická trakční zařízení*. Bratislava: Alfa, 1968. ISBN (nev.).
- [3] MOLEK, Tomáš. *Elektrifikace českých železnic* [online]. 9.11.2015 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/elektrifikace-ceskych-zeleznic/>
- [4] CHOCHOL, Bohumír. *Trakční napájecí stanice: II. díl*. Nakladatelství dopravy a spojů, 1966.
- [5] PAVLÍČEK, Jiří. *Elektrická trakce: Jednofázový trakční napájecí systém sníženého kmitočtu*[online].2005[cit.20190217]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015013101>
- [6] KOSTADINOV, Dečo a Daniel ŠKARDA. *Výpočet rušivých a nebezpečných vlivů střídavé trakce na sdělovací vedení*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1967.
- [7] FEJT, Jiří a Jiří RÝDLO. *Střídavá trakce*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1969.
- [8] VIKTORIN, J. *Vliv jednofázové střídavé trakce na sdělovací a zabezpečovací zařízení*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1962.
- [9] ČSN 34 1500 ed. 2 ZMĚNA Z1. *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Předpisy pro elektrická trakční zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [10] ČSN 34 2040 ed. 2. *Předpisy pro ochranu sdělovacích a zabezpečovacích vedení a zařízení před nebezpečnými a rušivými vlivy elektrické trakce 25 kV, 50 Hz*. Praha: Centrum služeb pro normalizaci, 1992.
- [11] HORÁK, Karel, Josef PALEČEK a Michal POKORNÝ. *Napájení elektrizovaných železnic: (elektroenergetika)*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1989. Knižnice nové techniky a technologie železniční dopravy. ISBN 80-7030-030-2

- [12] KÖPPEL, Karel a Ota HARTMAN. *Zásadní směrnice pro řešení ochrany úložných sdělovacích kabelů: před korozi, účinky atmosférických výbojů, nebezpečných a rušivých vlivů vedení VN a VVN a před účinky střídavé trakce ČSD*. Praha: SUDOP, 1972.
- [13] REDAKCE ČASOPISU. *Elektroinstalace: Požadavky na zemniče a jejich ukládání do půdy* [online]. 1. srpen 2018 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/elektroinstalace/pozadavky-na-zemnice-a-jejich-ukladani-do-pudy>
- [14] SIEMENS, "Technical and administrative barriers for rail traffic," Siemens, 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/railsolutions/locomotives/vectron/boundlessness/technical-barriers/pages/technicalbarriers.aspx>. [cit. 21-04-2016].
- [15] ČSN EN 50122-1 ed. 2. *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení – Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod: Část 1: Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [16] PRAKAB *Pražská kabelovna s.r.o.* [online]. In: . [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.prakab.cz/upload/TCEPKPFLEZE.pdf>
- [17] *Rail system: Electric Traction Systems* [online]. 2015 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <http://www.railsystem.net/electric-traction-systems/>
- [18] *The Railway Technical Website: Electric Traction Power* [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <http://www.railway-technical.com/infrastructure/electric-traction-power.html>
- [19] ČSN 33 2160. *Předpisy pro ochranu sdělovacích vedení a zařízení před nebezpečnými vlivy trojfázových vedení VN, VVN a ZVN*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

TNS		trakční napájecí stanice
EHV		elektrická hnací vozidla
EMV		elektrická motorová vozidla
VN		vysoké napětí
VVN		velmi vysoké napětí
TM		trakční motor
NS		napájecí stanice
DC		stejnoseměrná soustava
AC		střídavá soustava
POTV		prostor ohrožený trakčním vedením
VÚD		výzkumný ústav dopravní
OPDN		ochrana před nebezpečným dotykovým napětím
Z_k	[Ω /km]	impedance kolejnic
r_k	[-]	redukční činitel kolejí
F	[Hz]	kmitočet trakčního proudu
Z_{AK}, Z_{CK}, Z_{AC}	[Ω]	vzájemné impedance v dané soustavě
k	[-]	koeficient – proměnný dle počtu lokomotiv
l	[km]	délka souběhu
M	[H/km]	vzájemná indukčnost
σ	[Ω .m]	zdánlivý měrný odpor půdy
a	[m]	vzdálenost souběžných vedení
I	[A]	trakční proud

U	[V]	provozní napětí trakčního vedení
C	[F]	kapacita mezi trakčním vedením a ovlivňovaným předmětem
ω	[rad.s ⁻¹]	úhlový kmitočet pro 50 Hz ($\omega=2\pi f=314$)
I_z	[A]	zkratový proud
r_{kab}	[-]	redukční činitel pláště
μ_o	[H/m]	permeabilita země; $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$
U_z	[V]	indukované napětí do vazebního kabelu při zkratu
U_m	[V]	indukované napětí do vazebního kabelu při mimořádném stavu
q	[-]	koeficient stanovený normou; $q = 1,7811$
α	[-]	koeficient; $\alpha = \sqrt{\mu_o \frac{2\pi f}{6}} = 0,00281 \cdot \sqrt{\frac{f}{6}}$
x	[-]	parametr k určení vzorce pro výpočet M
I_{ekv}	[A]	ekvivalentní trakční proud
I_{celk}	[A]	výsledný trakční proud
U_n	[V]	indukované napětí při normálním stavu
I_m	[A]	trakční proud při mimořádném stavu
t_z	[s]	doba trvání zkratu
y_t	[m]	výška trakčního vedení
y_k	[m]	hloubka uložení zabezpečovacího kabelu
x_1	[m]	vzdálenost trakčního a zabezpečovacího vedení bodu A ₁
x_2	[m]	vzdálenost trakčního a zabezpečovacího vedení bodu B
r_c	[-]	celkový redukční činitel

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 - ELEKTRIZACE ŽELEZNIC V ČR	8
OBRÁZEK 2 - ELEKTRIZACE ŽELEZNIC V EU	8
OBRÁZEK 3 - JEDNOSTRANNÉ SOUSTŘEDĚNÉ NAPÁJENÍ	10
OBRÁZEK 4 - DVOUSTRANNÉ ROZLOŽENÉ NAPÁJENÍ DVOUKOLEJNÉ TRATĚ	11
OBRÁZEK 5 - ČTYŘSTRANNÉ NAPÁJENÍ DVOUKOLEJNÉ TRATĚ.....	11
OBRÁZEK 6 - SCHÉMA NAPÁJENÍ 1-F TRAKČNÍ SOUSTAVY 25 KV; 50 HZ	13
OBRÁZEK 7 - PROSTOR OHROŽENÝ TRAKČNÍM VEDENÍM (POTV)	15
OBRÁZEK 8 - JEDNOSTRANNÉ NAPÁJENÍ NORMÁLNÍ STAV	19
OBRÁZEK 9 - DVOUSTRANNÉ NAPÁJENÍ NORMÁLNÍ STAV	19
OBRÁZEK 10 - JEDNOSTRANNÉ NAPÁJENÍ MIMOŘÁDNÝ STAV	20
OBRÁZEK 11 - DVOUSTRANNÉ NAPÁJENÍ MIMOŘÁDNÝ STAV	20
OBRÁZEK 12 - SCHÉMA NEUTRALIZAČNÍHO TRANSFORMÁTORU	30
OBRÁZEK 13 - ZÁKLADNÍ SCHÉMA SOUBĚHU JEDNOTLIVÝCH VEDENÍ.....	37
OBRÁZEK 14 – PŮDORYSNÉ SCHÉMA OBECNÉHO A ŠIKMÉHO SOUBĚHU	38
OBRÁZEK 15 - SCHÉMA VZDÁLENOSTÍ ZABEZPEČOVACÍHO A TRAKČNÍHO VEDENÍ. .	39
OBRÁZEK 16 – PŮDORYSNÉ SCHÉMA ŠIKMÉHO SOUBĚHU	39
OBRÁZEK 17 - SITUAČNÍ SCHÉMA TRATI.....	45
OBRÁZEK 18 - KABEL TYPU TCEKPFLEZE	50
OBRÁZEK 19 - SITUAČNÍ SCHÉMA SOUBĚŽNÉHO KABELU.....	52

SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 - DRUHY VAZBY, TRAKCE A VOZIDEL	5
TABULKA 2 - HODNOTY PARAMETRŮ X, Y, Z	16
TABULKA 3 - REZISTIVITA PŮDY	18
TABULKA 4 - TABULKA VÝPOČTŮ	36
TABULKA 5 - TABULKA 14 NORMY ČSN 34 2040	50

SEZNAM GRAFŮ

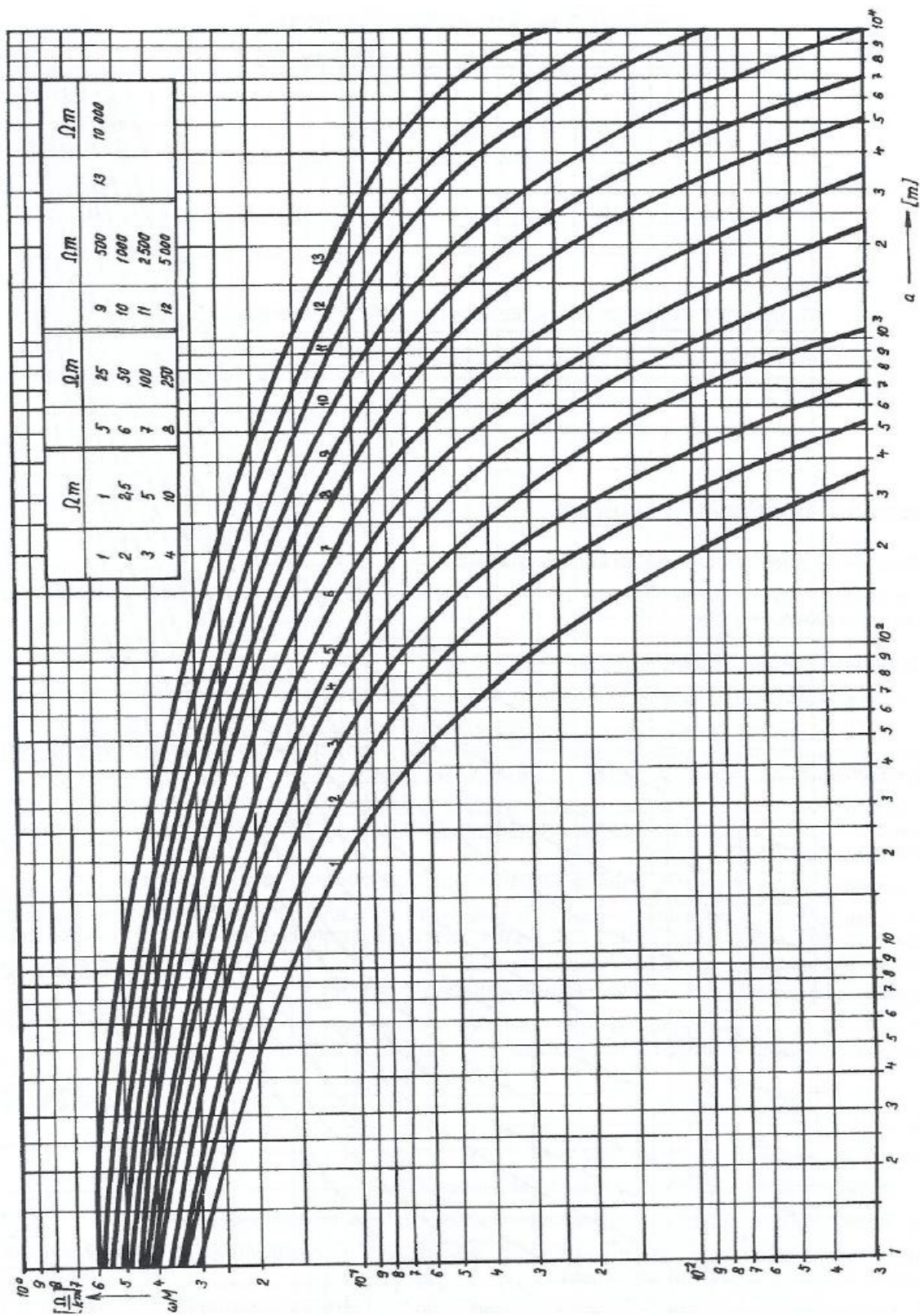
GRAF 1 - INDUKUJÍCÍ NAPĚTÍ VE STÁVAJÍCÍM KABELU	55
GRAF 2 - INDUKOVANÉ NAPĚTÍ V NAVRHOVANÉM KABELU	56
GRAF 3 - POROVNÁNÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ ZABEZPEČOVACÍCH KABELŮ NEELEKTRIZOVANÉ TRATI.....	57
GRAF 4 - INDUKOVANÉ NAPĚTÍ VE STÁVAJÍCÍM ZABEZPEČOVACÍM KABELU ELEKTRIZOVANÉ TRATI.....	58
GRAF 5 - INDUKOVANÉ NAPĚTÍ V NAVRHOVANÉM ZABEZPEČOVACÍM KABELU ELEKTRIZOVANÉ TRATI.....	58
GRAF 6 - POROVNÁNÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ ZABEZPEČOVACÍCH KABELŮ NEELEKTRIZOVANÉ TRATI.....	59

OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

xmart005_DP_výpočty.xlsx

xmart005_DP.pdf

Příloha č. 1: Graf pro určení vzájemné indukčnosti M dle ČSN 33 2140



**Příloha č. 2: Tabulka mezi nebezpečných elektromagnetických vlivů dle ČSN
33 2140**

		Druh sdělovacího vedení		Stav trakčního vedení	
				Mimořádný	Zkratový
Nadzemní vedení	S dřevěnými stožáry	Bez transformátorů	60 V	430 V	
		S transformátory	150 V	650 V	
Kabely	S železobetonovými nebo ocelovými stožáry nebo dřevěnými stožáry s uzemňovacími vedením	Bez transformátorů	60 V	150 V	
		S transformátory	150 V	430 V	
	místní	Bez transformátorů	60 V	Podle tabulky 14	
		S transformátory	60 % U_{iz} ; však max. 250 V	60 % U_{iz} ; však max. 650 V	
	dálkové	Bez transformátorů	60 V ⁽¹⁾	Podle tabulky 14 ⁽¹⁾	
		S transformátory	60 % U_{ik} při ⁽²⁾⁽³⁾ $U_{ik} \leq U_{tr}$ jinak 60 % U_{tr}	Podle tabulky 14 ⁽¹⁾	
dálkové	Bez transformátorů	60 V	Podle tabulky 14		
	S transformátory	60 % U_{iz} ; při $U_{iz} \leq U_{ik}$ jinak 60 % U_{ik}	60 % U_{iz} ; při $U_{iz} \leq U_{ik}$ jinak 60 % U_{ik}		
dálkové	Bez transformátorů	60 V ⁽¹⁾	Podle tabulky 14 ⁽¹⁾		
	S transformátory	60 % U_{ik} ; při ⁽²⁾ $U_{ik} \leq U_{tr}$ jinak 60 % U_{tr}	60 % U_{ik} ; při ⁽²⁾ $U_{ik} \leq U_{tr}$ jinak 60 % U_{tr}		

Příloha č. 3: Tabulka redukčního činitele kolejí dle ČSN 33 2140

Redukční činitel kolejí

Druh železniční trati	Kolejnice elektricky dobře propojené				Kolejnice elektricky špatně propojené			
	□ Vzdálenost od napájecí stanice				Vzdálenost od napájecí stanice			
	< 3 km		> 3 km		< 3 km		> 3 km	
	Provozní stav	Zkratový stav	Provozní stav	Zkratový stav	Provozní stav	Zkratový stav	Provozní stav	Zkratový stav
jednokolejná	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6
dvukolejná	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,7	0,5
Tři a více kolejíná	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,6	0,5

POZNÁMKA Hodnoty redukčního činitele kolejí jsou uvedeny pro střední odpor půdy $50 \Omega \cdot m$. Se stoupajícím odporem půdy hodnoty r_k klesají a naopak. Průběh redukčního činitele kolejí v závislosti na vzdálenosti od dvukolejné elektrizované trati při odporu půdy $24,4 \Omega \cdot m$ je uveden pro informaci na obrázku 16 a 17.

Hodnoty redukčního činitele platí pro základní kmitočet 50 Hz i pro referenční kmitočty 800 Hz, popř. 1 000 Hz.

Příloha č. 4: Tabulka indukovaného napětí zabezpečovacího vedení neelektrizované trati

Úsek Častolovice – Kostelec nad Orlicí - stávající kabel												
Uzly												
Počáteční	Koncový	a1 [km]	a2 [km]	a1+a2/2 [km]	Lskut [km]	x	M [μH/km]	r _{celk}	Um/1kA [V]	Uz/1kA [V]	Podmínka a1/a2	
A	A1	0,007	0,007	0,007	0,600	0,010159	1056	0,81	161,2316	161,2316	0,96	
A1	B	0,007	0,008	0,008	0,070	0,010538	1056	0,81	18,8103	18,8103	0,95	
B	B1	0,008	0,008	0,008	0,056	0,011349	1020	0,81	14,5353	14,5353	0,92	
B1	B2	0,008	0,010	0,009	0,045	0,012747	1020	0,81	11,6801	11,6801	0,87	
B2	C	0,010	0,013	0,011	0,048	0,015774	963	0,81	11,7626	11,7626	0,76	
C	C1	0,013	0,017	0,015	0,051	0,020927	919	0,81	11,9267	11,9267	0,75	
C1	C2	0,017	0,025	0,021	0,053	0,029864	839	0,81	11,3155	11,3155	0,67	
C2	D	0,025	0,044	0,035	0,066	0,048544	739	0,81	12,4115	12,4115	0,58	
D	D1	0,044	0,066	0,055	0,059	0,077211	660	0,81	9,9090	9,9090	0,66	
D1	E	0,066	0,097	0,082	0,074	0,114512	569,2	0,81	10,7184	10,7184	0,68	
E	E1	0,097	0,130	0,113	0,044	0,159418	514,4	0,81	5,7595	5,7595	0,74	
E1	E2	0,130	0,203	0,167	0,049	0,234143	429,8	0,81	5,3592	5,3592	0,64	
E2	F	0,203	0,305	0,254	0,057	0,357007	395,8	0,81	5,7410	5,7410	0,67	
F	G	0,305	0,527	0,416	0,090	0,584567	271,1	0,81	6,2088	6,2088	0,58	
G	H	0,527	0,873	0,700	0,090	0,983551	186,5	0,81	4,2713	4,2713	0,60	
H	I	0,873	1,155	1,014	0,150	1,424549	136,4	0,81	5,2064	5,2064	0,76	
I	N	1,155	2,279	1,717	0,300	2,412252	65,8	0,81	5,0232	5,0232	0,51	
N	O	2,279	2,054	2,167	0,340	3,043948	48,9	0,81	4,2308	4,2308	1,11	
O	P	2,054	2,225	2,140	0,310	3,006013	48,9	0,81	3,8575	3,8575	0,92	
P	Q	2,225	2,404	2,315	0,320	3,251887	36,9	0,81	3,0048	3,0048	0,93	
									Celkem	316,10	316,10	

Úsek Častolovice – Kostelec nad Orlicí - navrhovaný kabel												
Uzly												
Počáteční	Koncový	a1 [km]	a2 [km]	a1+a2/2 [km]	Lskut [km]	x	M [μH/km]	r _{celk}	Um _n /1kA [V]	Uzn _n /1kA [V]	Podmínka a1/a2	
A	A1	0,007	0,007	0,007	0,600	0,010159	1056	0,36	71,6585	71,6585	0,96	
A1	B	0,007	0,008	0,008	0,070	0,010538	1056	0,36	8,3602	8,3602	0,95	
B	B1	0,008	0,008	0,008	0,056	0,011349	1020	0,36	6,4601	6,4601	0,92	
B1	B2	0,008	0,010	0,009	0,045	0,012747	1020	0,36	5,1912	5,1912	0,87	
B2	C	0,010	0,013	0,011	0,048	0,015774	963	0,36	5,2278	5,2278	0,76	
C	C1	0,013	0,017	0,015	0,051	0,020927	919	0,36	5,3008	5,3008	0,75	
C1	C2	0,017	0,025	0,021	0,053	0,029864	839	0,36	5,0291	5,0291	0,67	
C2	D	0,025	0,044	0,035	0,066	0,048544	739	0,36	5,5162	5,5162	0,58	
D	D1	0,044	0,066	0,055	0,059	0,077211	660	0,36	4,4040	4,4040	0,66	
D1	E	0,066	0,097	0,082	0,074	0,114512	569,2	0,36	4,7638	4,7638	0,68	
E	E1	0,097	0,130	0,113	0,044	0,159418	514,4	0,36	2,5598	2,5598	0,74	
E1	E2	0,130	0,203	0,167	0,049	0,234143	429,8	0,36	2,3819	2,3819	0,64	
E2	F	0,203	0,305	0,254	0,057	0,357007	395,8	0,36	2,5515	2,5515	0,67	
F	G	0,305	0,527	0,416	0,090	0,584567	271,1	0,36	2,7595	2,7595	0,58	
G	H	0,527	0,873	0,700	0,090	0,983551	186,5	0,36	1,8983	1,8983	0,60	
H	I	0,873	1,155	1,014	0,150	1,424549	136,4	0,36	2,3140	2,3140	0,76	
I	N	1,155	2,279	1,717	0,300	2,412252	65,8	0,36	2,2325	2,2325	0,51	
N	O	2,279	2,054	2,167	0,340	3,043948	48,9	0,36	1,8804	1,8804	1,11	
O	P	2,054	2,225	2,140	0,310	3,006013	48,9	0,36	1,7144	1,7144	0,92	
P	Q	2,225	2,404	2,315	0,320	3,251887	36,9	0,36	1,3355	1,3355	0,93	
									Celkem	140,49	140,49	

Příloha č. 5: Tabulka indukovaného napětí zabezpečovacího kabelu elektrizované trati

Úsek Častolovice – Rychnov nad Kněžnou - stávající kabel											
Uzly											
Počáteční	Koncový	a ₁ [km]	a ₂ [km]	a ₁ +a ₂ /2 [km]	L _{skut} [km]	x	M [μH/km]	r _{celk}	U _m /1kA [V]	U _z /1kA [V]	Podmínka a ₁ /a ₂
A	AA	0,009	0,009	0,009	0,110	0,013078	989	0,81	27,6837	27,6837	0,965
AA	AB	0,009	0,010	0,010	0,093	0,013371	989	0,81	23,4053	23,4053	0,991
AB	AC	0,010	0,010	0,010	0,025	0,013558	989	0,81	6,2917	6,2917	0,982
AC	AD	0,010	0,010	0,010	0,039	0,014193	989	0,81	9,8151	9,8151	0,930
AD	AE	0,010	0,011	0,011	0,032	0,014984	963	0,81	7,8417	7,8417	0,964
AE	AF	0,011	0,011	0,011	0,026	0,015548	936	0,81	6,1928	6,1928	0,964
AF	AG	0,011	0,010	0,011	0,046	0,015024	963	0,81	11,2725	11,2725	1,114
AG	AH	0,010	0,012	0,011	0,124	0,015597	963	0,81	30,3867	30,3867	0,837
AH	AI	0,012	0,009	0,011	0,034	0,015119	963	0,81	8,3318	8,3318	1,280
AI	B	0,009	0,009	0,009	0,140	0,012662	1020	0,81	36,3382	36,3382	1,099
B	BA	0,009	0,009	0,009	0,188	0,012026	1020	0,81	48,7970	48,7970	1,006
BA	BB	0,009	0,011	0,010	0,113	0,014017	989	0,81	28,4387	28,4387	0,747
BB	BC	0,011	0,013	0,012	0,035	0,017498	940	0,81	8,3720	8,3720	0,847
BC	BD	0,013	0,009	0,011	0,018	0,015941	963	0,81	4,4110	4,4110	1,466
BD	BE	0,009	0,008	0,009	0,064	0,012366	1020	0,81	16,6117	16,6117	1,096
BE	BF	0,008	0,009	0,009	0,070	0,012117	1020	0,81	18,1691	18,1691	0,949
BF	BG	0,009	0,008	0,009	0,062	0,012014	1020	0,81	16,0615	16,0615	1,072
BG	BH	0,008	0,009	0,009	0,085	0,012467	1020	0,81	22,0625	22,0625	0,869
BH	BI	0,009	0,009	0,009	0,088	0,012724	1020	0,81	22,8411	22,8411	1,101
BI	C	0,009	0,008	0,008	0,036	0,011354	809	0,81	7,4112	7,4112	1,143
C	CA	0,008	0,008	0,008	0,115	0,011218	1056	0,81	30,9027	30,9027	0,895

Úsek Častolovice – Rychnov nad Kněžnou - navrhovaný kabel											
Uzly											
Počáteční	Koncový	a ₁ [km]	a ₂ [km]	a ₁ +a ₂ /2 [km]	L _{skut} [km]	x	M [μH/km]	r _{celk}	U _m /1kA [V]	U _z /1kA [V]	Podmínka a ₁ /a ₂
A	AA	0,009	0,009	0,009	0,110	0,013078	989	0,06	2,0506	2,0506	0,965
AA	AB	0,009	0,010	0,010	0,093	0,013371	989	0,06	1,7337	1,7337	0,991
AB	AC	0,010	0,010	0,010	0,025	0,013558	989	0,06	0,4661	0,4661	0,982
AC	AD	0,010	0,010	0,010	0,039	0,014193	989	0,06	0,7270	0,7270	0,930
AD	AE	0,010	0,011	0,011	0,032	0,014984	963	0,06	0,5809	0,5809	0,964
AE	AF	0,011	0,011	0,011	0,026	0,015548	936	0,06	0,4587	0,4587	0,964
AF	AG	0,011	0,010	0,011	0,046	0,015024	963	0,06	0,8350	0,8350	1,114
AG	AH	0,010	0,012	0,011	0,124	0,015597	963	0,06	2,2509	2,2509	0,837
AH	AI	0,012	0,009	0,011	0,034	0,015119	963	0,06	0,6172	0,6172	1,280
AI	B	0,009	0,009	0,009	0,140	0,012662	1020	0,06	2,6917	2,6917	1,099
B	BA	0,009	0,009	0,009	0,188	0,012026	1020	0,06	3,6146	3,6146	1,006
BA	BB	0,009	0,011	0,010	0,113	0,014017	989	0,06	2,1066	2,1066	0,747
BB	BC	0,011	0,013	0,012	0,035	0,017498	940	0,06	0,6202	0,6202	0,847
BC	BD	0,013	0,009	0,011	0,018	0,015941	963	0,06	0,3267	0,3267	1,466
BD	BE	0,009	0,008	0,009	0,064	0,012366	1020	0,06	1,2305	1,2305	1,096
BE	BF	0,008	0,009	0,009	0,070	0,012117	1020	0,06	1,3459	1,3459	0,949
BF	BG	0,009	0,008	0,009	0,062	0,012014	1020	0,06	1,1897	1,1897	1,072
BG	BH	0,008	0,009	0,009	0,085	0,012467	1020	0,06	1,6343	1,6343	0,869
BH	BI	0,009	0,009	0,009	0,088	0,012724	1020	0,06	1,6919	1,6919	1,101
BI	C	0,009	0,008	0,008	0,036	0,011354	809	0,06	0,5490	0,5490	1,143
C	CA	0,008	0,008	0,008	0,115	0,011218	1056	0,06	2,2891	2,2891	0,895