SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

Anton Cerman

Autoreferát dizertačnej práce

MODELOVANIE SPÄTNÝCH PRÚDOV V ELEKTRICKEJ TRAKCII

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**
v študijnom odbore 5.2.30. elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 27.8.2015

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Anton Cerman

Autoreferát dizertačnej práce

MODELOVANIE SPÄTNÝCH PRÚDOV V ELEKTRICKEJ TRAKCII

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:
Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 27.8.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

Predkladateľ: Ing. Anton Cerman
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

Školiteľ: prof. Ing. František Janíček, PhD.
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Oponenti: prof. Ing. Juraj Altus, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline, Elektrotechnická fakulta

prof. Ing. Stanislav Rusek, Csc.
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky

Autoreferát bol rozoslaný: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 27. 8. 2015 o 9:30 h.

Na Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU

Obsah

Tézy dizertačnej práce 4
Úvod 5
1 Blúdivé prúdy 6
1.1 Vznik blúdivých prúdov 6
1.2 Vedenie spätného trakčného prúdu 7
1.3 Uzemnenie zariadení elektrickej trakcie 7
1.3.1 Uzemnenie trakčnej napájacej stanice – pevné uzmenenie 7
1.3.2 Uzemnenie trakčnej napájacej stanice – bez uzemnenia 8
1.3.3 Uzemnenie trakčnej napájacej stanice – uzemnené diódou 8
2 Modelovanie spätných prúdov v elektrickej trakcii 10
2.1 Simulácie na rezistívnom 2D modeli 11
2.2 Dvojkoľajový model trate 15
2.3 Odporúčania na obmedzenie vzniku blúdivých prúdov vyplývajúce zo simulácií na rezistívnom 2D modeli 18
Záver 20
Vybraný zoznam literatúry 22
Publikácie autora 23

Tézy dizertačnej práce

- Analyzujte súčasné trendy v napájaní, uzemňovaní a technickej realizácii spätnej prúdovej cesty elektrickej trakcie.
- Teoreticky odvoďte jav blúdivých prúdov, ktoré vznikajú ako následok prevádzky elektrickej trakcie.
- Vytvorte model a odsimulujte správanie prúdov v systéme elektrickej trakcie.
- Navrhnite opatrenia na obmedzenie vzniku blúdivých prúdov v elektrickej trakcii.

Úvod

Blúdivé prúdy sú neoddeliteľným sprievodným javom prevádzkovania elektrickej trakcie, ktorých vplyvy sa najviac prejavujú práve v jej blízkom okolí. Ich prítomnosť v pôde urýchľuje koróziu kovových častí objektov a tým negatívne vplývajú na ich fyzikálne vlastnosti.

Hlavným dôvodom vzniku blúdivých prúdov je samotné riešenie trakčného napájacieho obvodu, ktorý najmä z ekonomického hľadiska využíva koľajnice na vedenie spätného trakčného prúdu smerom k trakčnej napájacej stanici. Hoci je tento problém známy už dlhú dobu, jeho riešenie je technicky a finančne náročné a vyžaduje si významný zásah do trakčného obvodu, alebo do stavebných úprav objektov ohrozovaných blúdivými prúdmi.

Najzraniteľnejšími objektmi sú železobetónové konštrukcie, ktoré sú pri prechode prúdu mechanicky oslabované z dôvodu korózie kovových výstuží. Ide najmä o mostové a tunelové stavby, ktoré bývajú navyše často situované práve v blízkosti elektrickej trakcie. Preto by mala byť zvláštna pozornosť venovaná sledovaniu a vyhodnocovaniu ich vlastností.

Korózny prieskum ešte pred začiatkom výstavby železobetónových stavieb v exponovaných miestach by mal byť súčasťou každého projektu. Na korózny prieskum môžu nadväzovať simulácie, ktoré umožňujú predpovedať nebezpečenstvo vplyvu blúdivých prúdov. V súčasnosti existujú viaceré 3D profesionálne programy, ktoré dokážu na základe vlastností pôdy a topológie systému veľmi spoľahlivo určiť smer toku a veľkosti prúdov. Elektrická trakcia však v podstate predstavuje rozľahlý 2D systém, v ktorom sa veľká časť prúdu šíri v smere koľajníc, čo nám dovoľuje vytvoriť dostatočne presný a zároveň jednoduchý model reprezentujúci horizontálne a vertikálne rozloženie systému.

Táto práca je zameraná na vytvorenie rezistívneho modelu, ktorý by dokázal simulovať toky prúdov v obvode elektrickej trakcie a tiež vo vymedzenej oblasti nachádzajúcej sa v blízkosti koľajníc. Výsledky jednotlivých simulácií popisujú správanie priebehov prúdov pri zmenách parametrov systému a vzťahy medzi vrstvami. V rámci rezistívneho 2D modelu je možné vytvárať rôzne zapojenia napájania elektrickej trakcie a meniť vlastnosti prvkov zmenou veľkosti odporu prislúchajúceho rezistora. Získané priebehy sú využiteľné na vyhodnotenie rýchlosti korózie a s tým spojenej životnosti jednotlivých korózii podliehajúcich častí systému. Výsledkom simulácií sú tiež odporúčania na obmedzenie veľkosti vznikajúcich blúdivých prúdov. Model je možné považovať za nástroj, pomocou ktorého je možné v relatívne krátkom čase predbežne vyhodnotiť rozsah nebezpečenstva, ktoré predstavujú blúdivé prúdy.

1 Blúdivé prúdy

Blúdivý prúd je definovaný ako neželaný tok elektrického prúdu prechádzajúci budovami, pôdou, alebo inými objektmi a zariadeniami. Je spôsobený rozdielom potenciálov medzi dvoma miestami, medzi ktorými by za normálnych okolností nemal rozdiel existovať. Rozdiel napätia, ktorý tok prúdu spôsobuje, má zvyčajne nízke hodnoty, pôsobí však neustále a dlhodobo. Napätie vzniká medzi uzemnenými objektmi v dôsledku normálnej prevádzky elektrizačnej sústavy. Veľké hodnoty rozdielu napätia signalizujú poruchu v elektrizačnej sústave. [1]

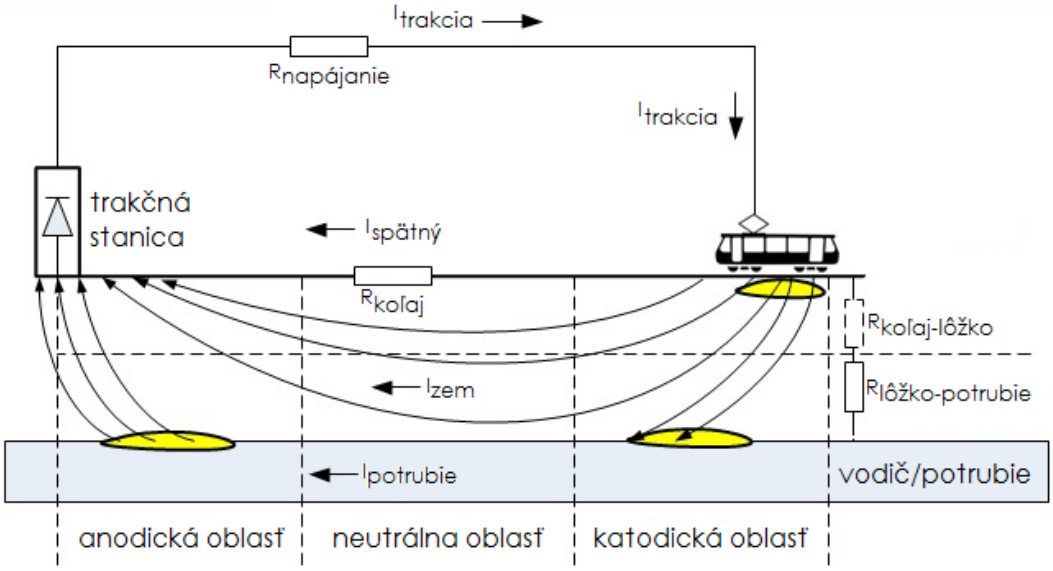
1.1 Vznik blúdivých prúdov

Problém blúdivých prúdov je spojený najmä s prevádzkou trakčných systémov využívaných v systéme verejnej dopravy ako sú napr. železnice, električková verejná doprava, alebo metro, kde sa koľaje z ekonomického hľadiska využívajú ako neutrálny (spätný) vodič. Využívanie koľají ako spätného vodiča je základom problémov s blúdivými prúdmi. Kvôli ich nedokonalej izolácii a konečnej veľkosti pozdĺžneho odporu, malá časť trakčného prúdu uniká smerom do zeme.

Podľa Ohmovho zákona v každom vodiči, ktorým prechádza elektrický prúd, dochádza k poklesu napätia úmerne so zvyšovaním jeho odporu. Výsledkom je, že železničné koľaje majú po svojej dĺžke rôzne napätie, a tiež rozdielne napätie od predmetov uložených v zemi, ako napr. kovové potrubia a káble.

Pretože pôda nemá dokonalé izolačné vlastnosti, potenciálový rozdiel medzi koľajnicami a vodivými materiálmi uloženými v zemi bude mať za následok vytvorenie toku prúdu smerom do pôdy, ktorý sa následne šíri pôdnym prostredím smerom k trakčnej stanici (meniarni). Na tejto ceste vzniká veľké množstvo katodických a anodických oblastí (Obr.1). Veľkosť prúdu je závislá od relatívneho celkového odporu jednotlivých možných spätných ciest (koľaje, pôda, priľahlá infraštruktúra). [2] [3]

Veľkosť prúdu unikajúceho z koľají závisí od veľkosti poklesu napätia na koľajniciach v dôsledku ich nenulového pozdĺžneho odporu. Pre typickú elektrifikovanú železnicu vo všeobecnosti približne platí, že 95 % prúdu sa do trakčnej stanice vracia cez koľaje a zvyšných 5 % tečie zemou. Každé prerušenie elektrickej kontinuity spätnej cesty zvyšuje únik blúdivých prúdov a ich intenzitu. Charakter blúdivých prúdov je dynamický – neustále sa mení ich amplitúda a smer toku. Tieto premenné sú ovplyvnené záťažou a pozíciou elektrického vozidla vzhľadom k trakčnej stanici. Dynamická zmena potenciálov spôsobuje zmeny polarizácie (katodická / anodická) objektov v zemi. [4]



Obr.1 Oblasti pôsobenia blúdivých prúdov [5]

Na kovových zariadeniach sa vytvárajú 3 potenciálové oblasti [6]:

- **katodická oblasť** – v miestach, kde elektrický prúd vstupuje do zariadenia z pôdy, z hľadiska korózie nie je oblasť nebezpečná, ale vplyvom vodíka, ktorý vzniká pri chemickej reakcii na anóde dochádza ku krehnutiu materiálu, a tým tu zníženiu jeho pevnosti;
- **neutrálna oblasť** – v miestach, kde blúdivé prúdy pretekajú zariadením, oblasť nie je ohrozená koróziou;
- **anodická oblasť** – v miestach, kde blúdivé prúdy vystupujú zo zariadenia, oblasť je z hľadiska korózie veľmi nebezpečná, pretože v nej dochádza k elektrolytickému rozkladu kovu, ktoré sa prejavuje bodovým prederavením.

Výsledkom pôsobenia blúdivých prúdov prechádzajúcich kovovým materiálov je elektrolytická korózia, ktorá urýchľuje znehodnocovanie vlastností materiálu a úbytok kovu na mieste exponovaného povrchu.

Blúdivé prúdy môžu taktiež spôsobovať významné problémy napríklad signalizačným zariadeniam, alebo vytvorením nebezpečne vysokého napätia na vodivých predmetoch, ktoré následne ohrozujú život človeka a zvierat. [2] [3]

1.2 Vedenie spätného trakčného prúdu

V elektrickej trakcii je najčastejšie spätný prúd vedený vodivou cestou z hnacieho vozidla do trakčnej napájacej stanice pomocou koľají. Spätné vedenie musí byť riešené tak, aby spoľahlivo a bez negatívnych vplyvov na bezpečnosť prevádzky dokázalo doviesť spätné trakčné, rekuperačné, skratové prípadne iné poruchové prúdy priamo do napájacej stanice. Odpor spätného vedenia sa musí udržiavať na čo najnižšej hodnote z dôvodu vzniku blúdivých prúdov a udržania dotykových napätí v požadovaných medziach. Jednotlivé koľajnice sú preto vybavené pozdĺžnymi a priečnymi spojkami.

Pri jednosmerných sústavách je najdôležitejšou požiadavkou dodržanie čo najväčšieho odporu koľajnicového vedenia (železničného zvršku) voči zemi a voči uzemneným zariadeniam v blízkosti trate. Na pozdĺžnom odpore koľajnicového vedenia vzniká úbytok napätia, ktorý je pri väčších prevádzkových prúdoch, alebo pri skratoch príčinou zvyšovania potenciálu koľají.

Na spätných koľajových vedeniach vznikajú induktívne napäťové úbytky, ktoré sú pri frekvencii 16,7 Hz približne rovnako veľké ako úbytky pri jednosmerných sústavách a pri frekvencii 50 Hz sú približne dvojnásobné. Pri väčších vzdialenostiach trakčných napájacích staníc typických pre striedavé systémy dochádza k vyšším potenciálom koľají voči zemi. Zníženie potenciálov je možné dosiahnuť uzemnením spätného vedenia. V dôsledku tohto opatrenia tečie časť spätného prúdu zemou a vodivými objektmi uloženými v zemi, čo sa prejavuje rušením elektronických systémov.

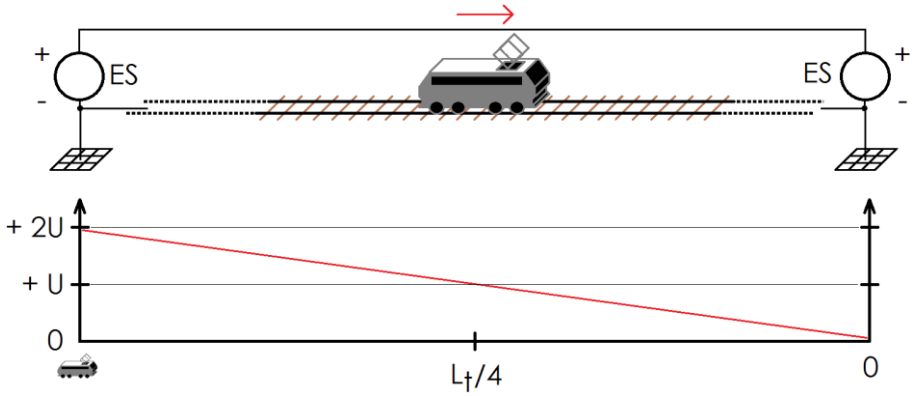
1.3 Uzemnenie zariadení elektrickej trakcie

Primárnou funkciou uzemňovacieho systému v elektrickej trakcii je vytvoriť cestu pre spätný prúd. Hlavná technická norma, ktorá je venovaná uzemneniu a pospájaniu v elektrickej trakcii za účelom zabezpečenia elektrickej bezpečnosti v dráhových aplikáciách jednosmerného a striedavého napätia je európska norma „EN 50122-1: Dráhové aplikácie. Pevné inštalácie. Elektrická bezpečnosť, uzemňovanie a spätné vedenie“. V dráhových aplikáciách so striedavým napätím sa uprednostňuje metóda pospájania všetkých kovových častí s uzemnením trakčnej stanice, v systémoch s jednosmerným napätím sa odporúča izolácia spätného vedenia od ostatných častí.

1.3.1 Uzemnenie trakčnej napájacej stanice – pevné uzmenenie

Zapojenie s pevným uzemnením trakčnej napájacej stanice sa v súčasnosti už nepoužíva z dôvodu jeho nepriaznivých vlastností. Záporná zbernica je spojená so zemou s ohľadom na dosiahnutie čo najnižšej hodnoty odporu uzemnenia. V uzemnenom systéme, v ktorom sú koľajnice spojené so zemou

cez zemný kolektor alebo inú železobetónovú konštrukciu, bude nadobúdať napätie koľajníc vždy kladnú hodnotu vzhľadom na potenciál zeme. To znamená, že prúd tečúci koľajnicami bude po celej ich dĺžke unikať smerom do zeme, v ktorej sa bude šíriť, až kým nedosiahne uzemnenie trakčnej stanice.



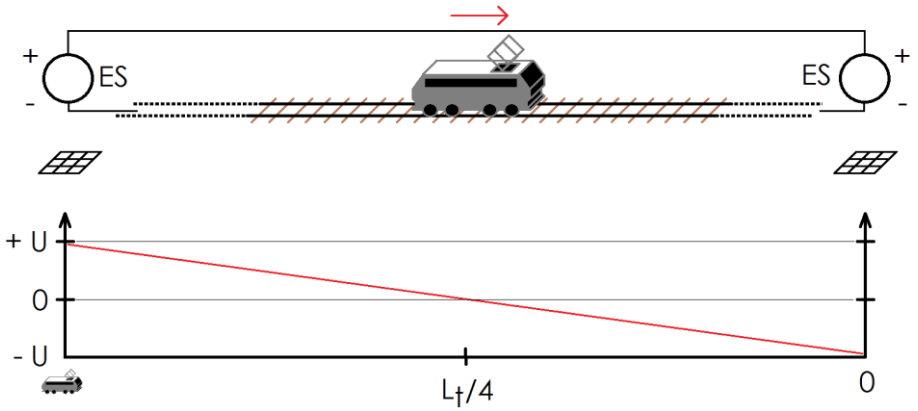
Obr.2 Principiálna schéma zapojenia a priebeh napätia uzemneného systému

Veľkosť blúdivých prúdov je určená z veľkosti napätia medzi koľajnicou a referenčnou zemou. Ak sa elektrické vozidlo nachádza v strede medzi dvoma napájacími stanicami, priebeh napätia sa bude správať tak, ako je zobrazené na obr.2. Hodnota napätia bude mať dvojnásobnú veľkosť v porovnaní s neuzemneným systémom.

Jednou z mála výhod tohto systému je, že veľkosť napätia spätného obvodu v mieste uzemnenia je rovnako veľká ako potenciál zeme, čím sa významne znižuje riziko vzniku nebezpečného dotykového napätia.

1.3.2 Uzemnenie trakčnej napájacej stanice – bez uzemnenia

Neuzemnené systémy nemajú žiadne priame vodivé spojenie so zemou. Pri pohybe elektrického vozidla po koľajniciach potenciál koľajníc kolíše z dôvodu plávajúceho napätia spätnej prúdovej cesty v mieste trakčnej stanice. Veľkosť napätia je v porovnaní s priamo uzemneným systémom polovičná a nadobúda kladné aj záporné hodnoty, ako je znázornené na obr.3.



Obr.3 Principiálna schéma zapojenia a priebeh napätia neuzemneného systému

V prvej časti trate uniká prúd z koľajníc smerom do zeme, v druhej časti sa blúdivý prúd vracia naspäť do koľajníc. Plávajúci potenciál v mieste trakčnej napájacej stanice predstavuje potenciálne riziko pre vznik nebezpečného dotykového napätia. Neuzemnené systémy je preto nutné vybaviť doplnkovými ochrannými zariadeniami.

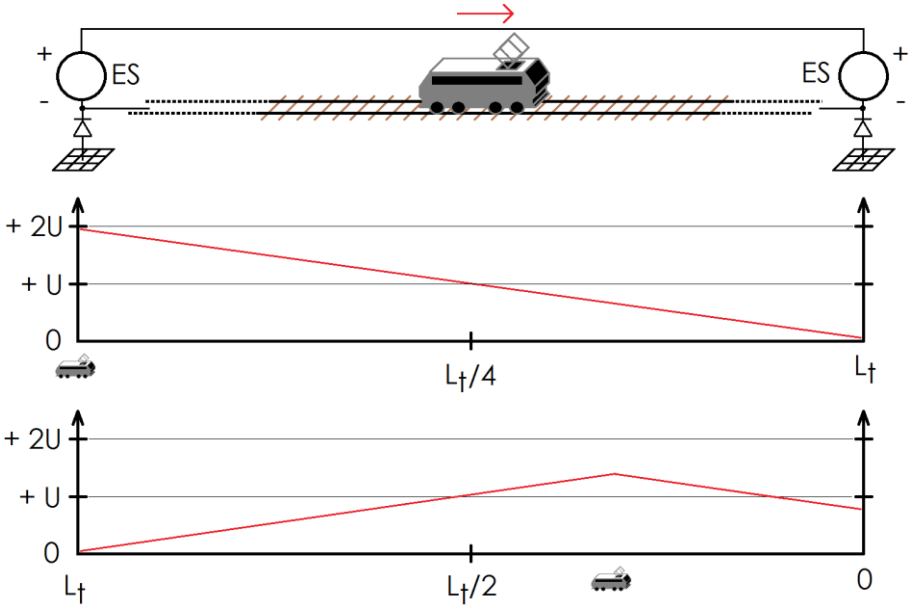
1.3.3 Uzemnenie trakčnej napájacej stanice – uzemnené diódou

Diódou uzemnené trakčné sústavy predstavujú kompromis medzi pevne uzemnenými a neuzemnenými trakčnými systémami. Najčastejšie sa využívajú na obmedzenie veľkosti blúdivých

prúdov z pevne uzemnených systémov a zároveň udržujú napätie na bezpečnej úrovni. Na obr.4 je znázornená zjednodušená schéma systému a priebeh napätia pri pohybe elektrického vozidla po trati.

Spojenie s uzemnením trakčnej stanice je realizované priamym kovovým spojením, ktoré prechádza cez obvod s diódou. Diódový obvod umožňuje tok prúdu z uzemnenia k zápornému pólu v prípade, že veľkosť napätia prekročí projektovanú hodnotu, ktorú je možné nastaviť s ohľadom na lokálne podmienky. Dióda zapojená medzi zem a zápornú zbernicu trakčnej stanice pomáha zabezpečiť udržanie vysokého vzájomného odporu medzi koľajnicami a zemou, no aj napriek tomu však môže naďalej dochádzať ku korózii spôsobenej blúdivými prúdmi v miestach upevňovačov koľajíc.

Rovnako pri prekročení hraničného napätia, ktoré vzniká na spätnej prúdovej ceste, môže dochádzať k opakovanému vybíjaniu napätia cestou najmenšieho odporu smerom do zeme.



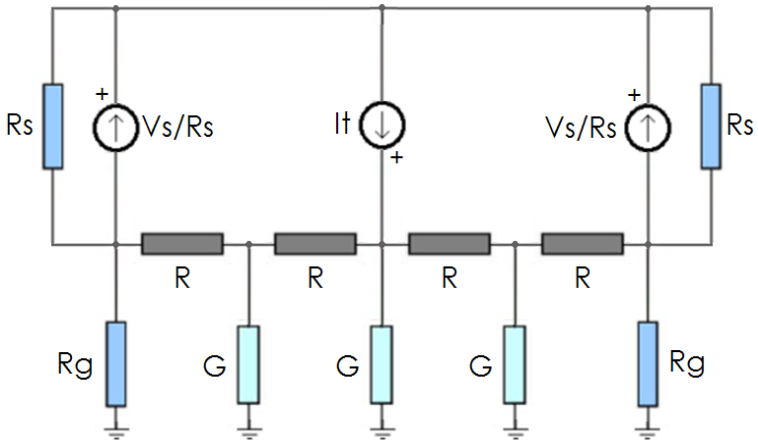
Obr.4 Principiálna schéma zapojenia a priebeh napätia diódou uzemneného systému

Priebeh napätia je podobný priamo uzemnenému systému, ak sa elektrické vozidlo nachádza v presnom strede medzi trakčnými napájacími stanicami. Približovaním k trakčnej stanici sa vytvára v mieste uzemnenia kladné napätie.

2 Modelovanie spätných prúdov v elektrickej trakcii

Zatiaľ čo železničná trať je vo svojej podstate veľkým jednorozmerným systémom, modelovanie šírenia blúdivých prúdov v zemi je omnoho zložitejšie. Dôvodom je šírenie prúdu vo všetkých smeroch, teda ide o typický trojdimenzionálny jav.

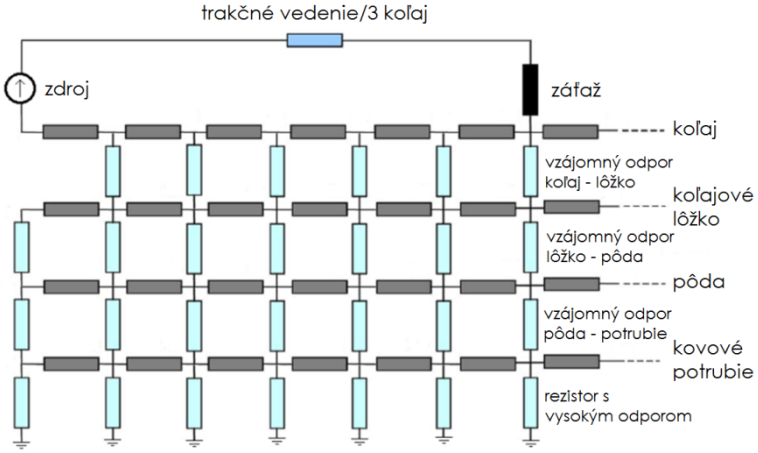
Základné modely pozostávajú zo siete rezistorov, ktoré predstavujú koľaje, pôdu a ich vzájomný odpor. Ide o metódy využívajúce sústredené parametre, alebo Π článok, v ktorom je trať rozdelená na úseky s rovnakou dĺžkou, ku ktorým je priradený vzájomný odpor koľajníc a zeme. Ako príklad spomínaného modelu je možné uviesť Nortonov model znázornený na obr.5.



Obr.5 Nortonov model trate s dvoma stanicami a elektrickým vozidlom uprostred

Vo všeobecnosti je možné povedať, že rozdelenie trate na úseky s dĺžkou 100 metrov poskytuje dostatočnú presnosť simulácie. Ak však dochádza na úseku k výraznej zmene parametrov modelu, dĺžku tohto úseku je možné prispôsobiť pre potreby získania relevantných údajov.

Komplikovanejším modelom uvažujúcim s viacerými štruktúrami je rezistívny 2D model na obr.6. Model obsahuje okrem koľaje, zvodu koľaje a pôdy aj iné objekty, akými sú vodivé predmety uložené v zemi, alebo napr. koľajové lôžko.



Obr.6 Zobrazenie 2D modelu trate s napájaním z jednej strany [7]

Vodorovné vrstvy sú prepojené zvislými rezistormi charakterizujúcimi vzájomný odpor medzi vrstvami. Simulácia je v najnižšej vrstve ohraničená rezistormi s veľkou hodnotou odporu, ktoré definujú hranice simulácie. V rámci rezistívneho 2D modelu je možné vytvárať rôzne zapojenia napájania elektrickej trakcie a meniť vlastnosti prvkov zmenou veľkosti odporu rezistorov. Výhodou modelu je jeho relatívne jednoduchá konštrukcia a malé nároky na výpočtovú techniku, z ktorej

vyplýva aj krátky čas priebehu simulácie. Jednoduchý 2D model je možné rozšíriť na viackoľajový systém.

Hlavnou nevýhodou modelu je jeho obmedzené využitie v prípade riešenia komplexných situácií so zmenami parametrov v simulovanej oblasti, akou je napr. veľká nehomogenita pôdy, pôda s viacerými vrstvami, alebo množstvo rôznych vodivých predmetov uložených v pôde. V prípade, že nedochádza k veľkým zmenám parametrov je presnosť 2D rezistívneho modelu veľmi dobrá, čo bolo potvrdené v článku [7], v ktorom bol porovnaný 2D model s 3D modelom vytvoreným v profesionálnom simulačnom programe CDEGS.

2.1 Simulácie na rezistívnom 2D modeli

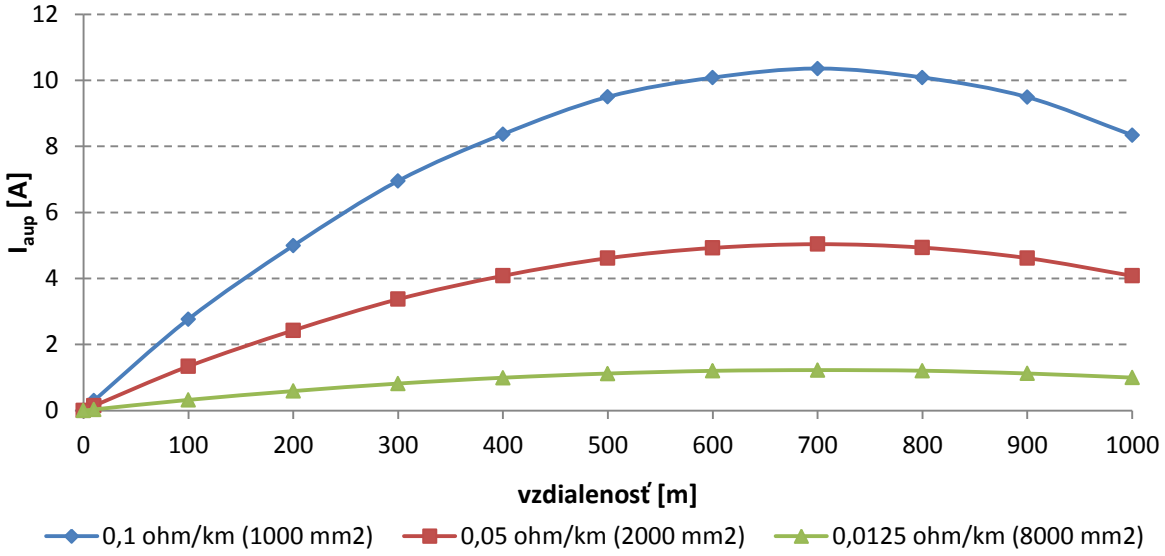
V rámci simulácií na modeli bolo vytvorených celkovo 7 prípadových štúdií, ktorých cieľom bolo popísať správanie spätného trakčného prúdu pri rôznych situáciách, zapojeniach, topológii a parametroch elektrickej trakcie.

Prípadové štúdie boli vytvorené pre nasledovné scenáre:

- vplyv veľkosti prierezu koľaje,
- vplyv veľkosti odporu izolácie medzi koľajnicami a zemou,
- vplyv hĺbky uloženia potrubia,
- vplyv veľkosti prierezu potrubia,
- nesymetrický model s potrubím uloženým v prvej polovici trate,
- vplyv počasia na šírenie blúdivých prúdov,
- efektivita zemného kolektora.

Vplyv veľkosti prierezu koľaje

Z výsledkov je možné usúdiť, že zvyšovaním vodivosti spätnej cesty tvorenej koľajnicami je možné redukovať veľkosť prúdov unikajúcich do zeme. Rovnako dôležitá je ale aj voľba optimálneho spôsobu uzemnenia trakčných napájacích staníc. Ako lepšie riešenie sa pri tomto jednoduchom modeli ukazuje byť neuzemnený systém, pri ktorom vzniká v porovnaní s uzemneným systémom asi o 2/3 menej blúdivých prúdov.

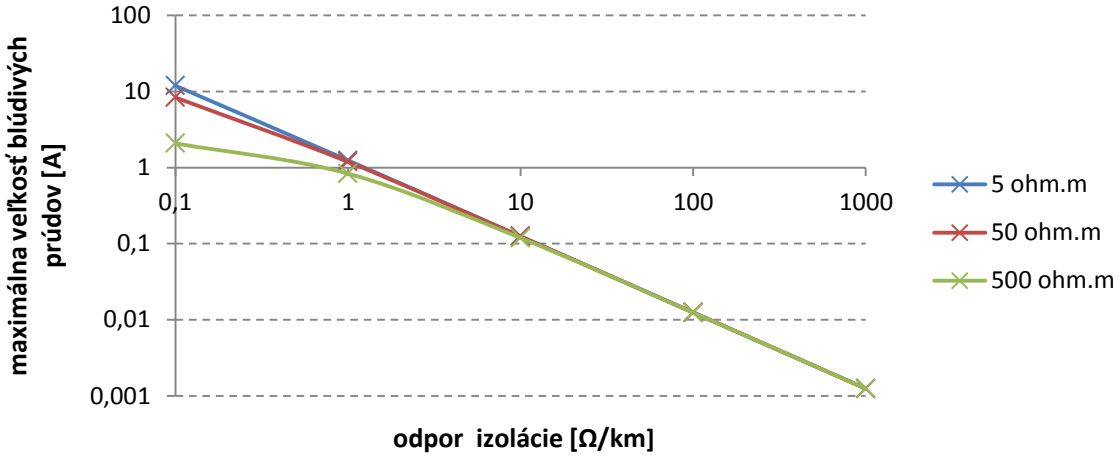


Obr.7 Absolútna hodnota unikajúcich prúdov – priamo uzemnený systém

Vplyv veľkosti odporu izolácie medzi koľajnicami a zemou

Zvyšovaním odporu izolácie dochádza k významnej redukcii veľkosti blúdivých prúdov a zároveň, že zvyšovaním izolačného odporu medzi koľajnicou a podvalom sa znižuje dôležitosť izolačných

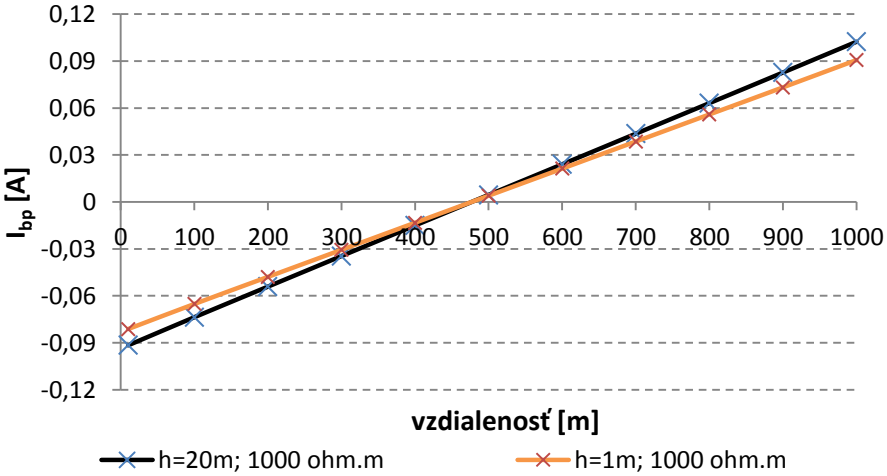
vlastností materiálu, z ktorého sú vyrobené samotné podvaly koľajníc. Zatiaľ, čo pri hodnote izolačného odporu podložky 0,1 Ω/km ovplyvňuje materiál podvalov významne veľkosť blúdivých prúdov, pri izolačnom odpore 10 Ω/km sú rozdiely simulovaných hodnôt minimálne. Význam izolácie koľajníc sa výraznejšie prejavuje v priamo uzemnených systémoch.



Obr.8 Hodnoty blúdivých prúdov vzhľadom na odpor izolácie a rezistivitu materiálu podvalov priamo uzemnenej sústavy

Rezistivita materiálu podvalov nemá významný vplyv na veľkosť blúdivých prúdov, ak je hodnota odporu izolácie väčšia ako 5 Ω/km. Pri normálnych prevádzkových stavoch je možné povedať, že vlastnosti izolačného materiálu uloženého medzi koľaj a podval sú z hľadiska úniku prúdov smerom do zeme oveľa dôležitejšie, ako samotný materiál podvalu.

Vplyv hĺbky uloženia potrubia



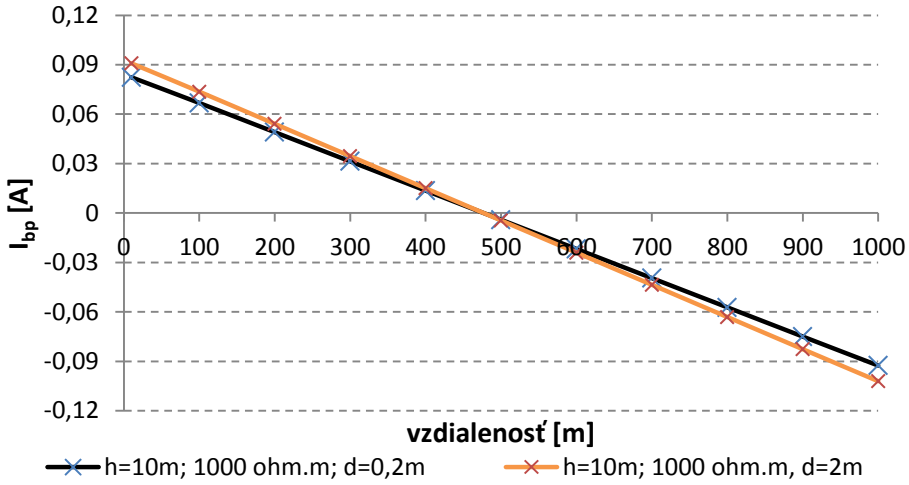
Obr.9 Vplyv hĺbky uloženia potrubia na veľkosť blúdivých z koľajníc pri rezistivite pôdy 1000 Ω.m – statická simulácia

Zmena hĺbky uloženia potrubia vyvolá podľa výsledkov simulácie zmenu veľkosti blúdivých prúdov najmä v pôdach s vysokou rezistivitou. Kým zmena hĺbky uloženia potrubia v pôde s nízkou rezistivitou nevyvolala významnú zmenu veľkosti blúdivých prúdov, v pôde s rezistivitou 1000 Ω.m je rozdiel hodnôt pozorovateľný.

Rozdielne hodnoty I_{bd} pre hĺbku 1 meter a 20 metrov sú tiež spôsobené povahou šírenia prúdu v pôde. Zem je v porovnaní s koľajnicami alebo kovovým potrubím veľmi zlým vodičom. Ak je ale plocha ktorou prúd prechádza dostatočne veľká, veľkosť odporu môže klesnúť na hodnoty, kedy sa stáva dobrým vodičom. Elektróda uložená vo väčšej hĺbke má preto nižší odpor uzemenenia, čo sa prejavuje na vyššej hodnote I_{bd} pre hĺbku 20 metrov.

Vplyv veľkosti prierezu potrubia

Zmenou veľkosti prierezu potrubia sa mení jeho uzemňovací odpor, no napriek 10 násobnému zväčšeniu priemeru došlo len k malej zmene veľkosti blúdivých prúdov.

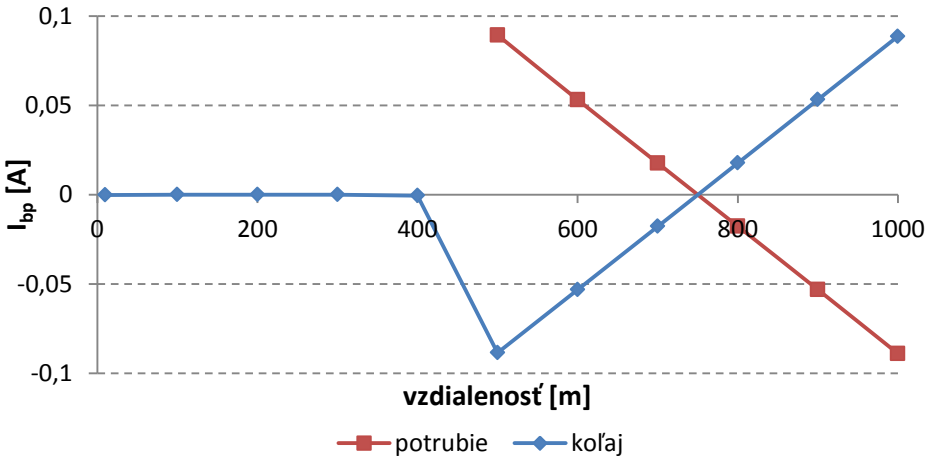


Obr.10 Vplyv veľkosti priemeru potrubia na veľkosť blúdivých prúdov vznikajúcich na potrubí – statická simulácia

Na odpor uzemnenia zariadení uložených v zemi vplýva ich materiál, konštrukcia samotného uzemňovača, dĺžka a hĺbka uloženia a jeho rozmery (priemer). Odpor horizontálneho, alebo vertikálneho uzemňovača vieme najefektívnejšie ovplyvniť uložením od väčšej hĺbky a ak to nie je kvôli podložiu možné, tak zapojením viacerých elektród paralelne, alebo predĺžením uzemňovacej elektródy. Zdvojnásobenie dĺžky môže znamenať zníženie odporu aj o 40 %. Zväčšovaním priemeru uzemňovača nedochádza k zásadnému znižovaniu odporu, pričom zdvojnásobením jeho priemeru dosiahneme zníženie o najviac 10 %.

Nesymetrický model s potrubím uloženým v prvej polovici trate

Priebehy prúdu v koľajnici a potrubí nadobúdajú v rozpätí 1000 m – 500 m navzájom prevrátené hodnoty. Vo vzdialenosti elektrického vozidla 1000 m od napájacej stanice (Obr.11) je hodnota prúdu v potrubí záporná čo značí, že prúd do potrubia vteká. Na jeho opačnom konci vo vzdialenosti 500 m prúd uniká smerom do zeme a následne naspäť do koľajníc. V úseku koľajníc bez uloženého potrubia nevzniká alternatívna cesta pre spätný trakčný prúd a veľkosť blúdivých prúdov je tak veľmi malá. Prítomnosť vodivých predmetov v pôde v blízkosti elektrickej trakcie má za následok výrazné zvýšenie veľkosti blúdivých prúdov.



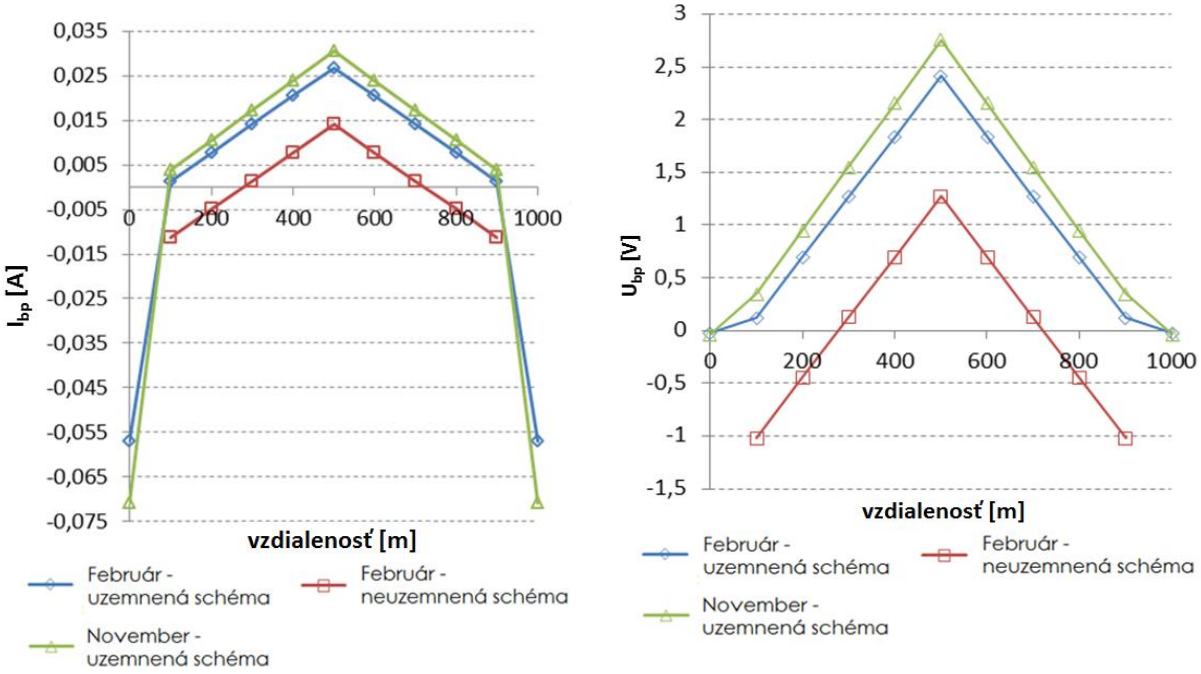
Obr.11 Priebeh prúdu v koľajnici a potrubí – statická simulácia (vozidlo vo vzdialenosti 1000 m)

Vplyv počasia na šírenie blúdivých prúdov

Rezistivita pôdy je kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim odpor uzemnenia elektrickej inštalácie a predurčuje veľkosť napätia uzemňovacej sústavy, ktoré vznikne v uzemnení pri prechode prúdu. Rozdiel medzi minimálnou a maximálnou hodnotou posudzovaného odporu uzemnenia bol 20 %.

Vlastnosti neuzemnenej sústavy sú lepšie v porovnaní s uzemnenou sústavou, ktorá vykazuje v rovnakom mesiaci dvojnásobné hodnoty veľkosti blúdivého napätia vyvolávajúceho tok blúdivých prúdov.

Ak vyhodnotíme priebeh napätia a prúdu neuzemneného systému (Obr.12), v úseku trate medzi 270 - 730 metrami uniká prúd z koľajníc smerom do zeme a v úsekoch 0 -270 metrov a 730 - 1000 metrov sa spätný trakčný prúd vracia naspäť do spätného vedenia. V uzemnenom systéme uniká trakčný prúd z koľajníc po celej ich dĺžke a vracia sa do systému až cez uzemnenie trakčnej napájacej stanice.



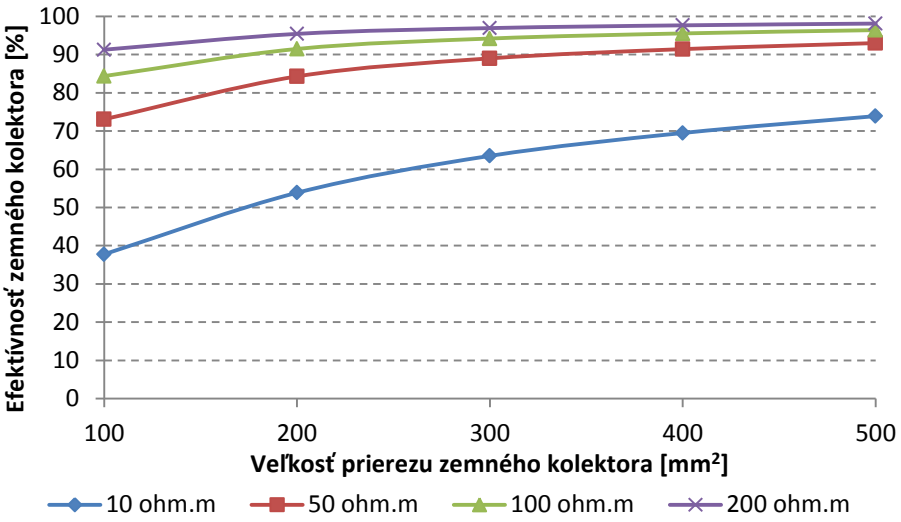
Obr.12 Diagram distribúcie blúdivého prúdu (vľavo) a blúdivého napätia (vpravo) na koľajnici

Rozdiely vo veľkosti prúdu a napätia spôsobené zmenou rezistivity v sledovaných mesiacoch sú približne 10 až 15 %, čo nie je až také významné z pohľadu nebezpečenstva vzniku korózie, ale skôr z pohľadu dodržania bezpečných hodnôt dotykových napätí.

Efektivita zemného kolektora

Funkcia zemného kolektora spočíva v odčerpávaní prúdov tečúcich v pôde a v ich odvedení do záporného pólu napájacej stanice. Zemné kolektory sa využívajú najmä tam, kde blúdivé prúdy predstavujú nadmerné nebezpečenstvo pre elektrické zariadenia a železobetónové objekty, ale aj v systémoch, v ktorých nie je možné vykonať žiadny zásah do obvodu spätnej prúdovej cesty, alebo napájania úseku trate. Graf na obr.13 zachytáva percentuálny podiel prúdu zachytený zemným kolektorom. Efektívnosť je možné vyhodnotiť ako pomer veľkosti prúdu, ktorý uniká z koľajníc smerom do kolektora a veľkosti prúdu, ktorý z kolektora odchádza smerom do pôdy.

Výkonnosť zberacieho systému v pôdach s rezisitvitou 10 Ω.m sa pohybuje v závislosti od veľkosti prierezu kolektora medzi 38 až 74 %. Zvyšovaním rezisitivity prostredia v okolí zberača rastie jeho efektívnosť, ktorú je možné ďalej zlepšovať využitím viacerých vodičov. Z ekonomického hľadiska je v pôdach z nízkou rezistivitou vhodné zvážiť iné možnosti na obmedzenie šírenia blúdivých prúdov z dôvodu finančnej náročnosti realizácie kolektorového systému.

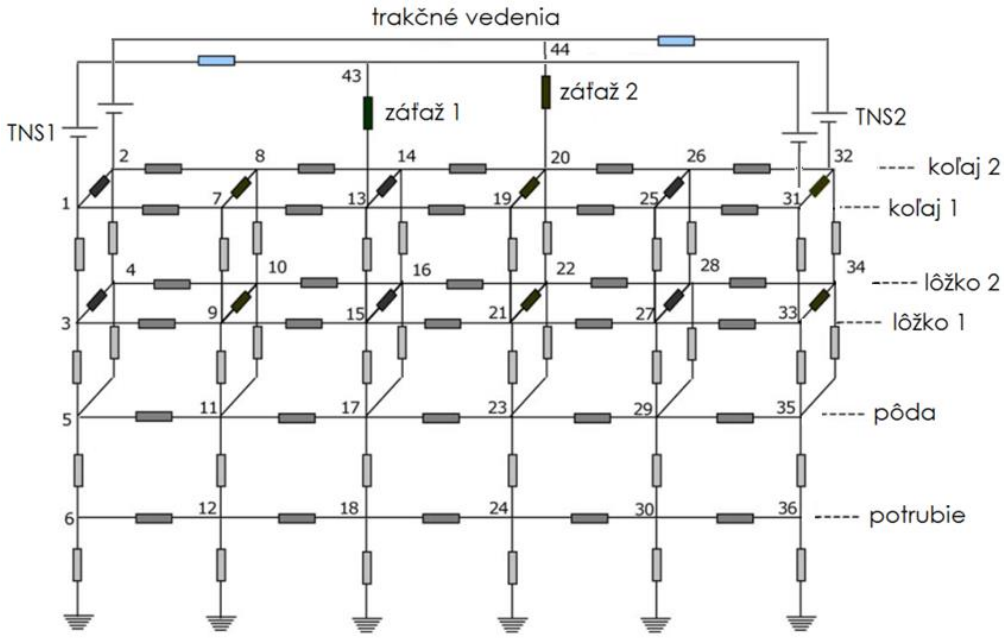


Obr.13 Efektívnosť zemného kolektora v závislosti od veľkosti jeho prierezu

2.2 Dvojkoľajový model trate

Hlavným výstupom dizertačnej práce je vytvorenie a simulovanie na modeli dvojkoľajovej trate, ktorý je zostavený podľa schémy na obr.14. Pozostáva z dvoch samostatných systémov, ktoré sú vzájomne prepojené priečnymi prepojkami tak, ako to býva realizované v skutočnej prevádzke. Ak by sme chceli modelovať systém bez priečnych prepojok, systémy by boli previazané odporom nahrádzajúcim pôdu a jeho veľkosť by bola závislá od vzdialenosti koľají a rezistivity pôdy.

Po trati napájanej z dvoch strán sa pohybujú dve elektrické vozidlá v opačnom smere a ich počiatočná pozícia je v uzle trakčných napájacích staníc. Model sa skladá zo štyroch vrstiev – 2 vrstvy sú modelované samostatne pre každú koľaj a 2 vrstvy sú spoločné.



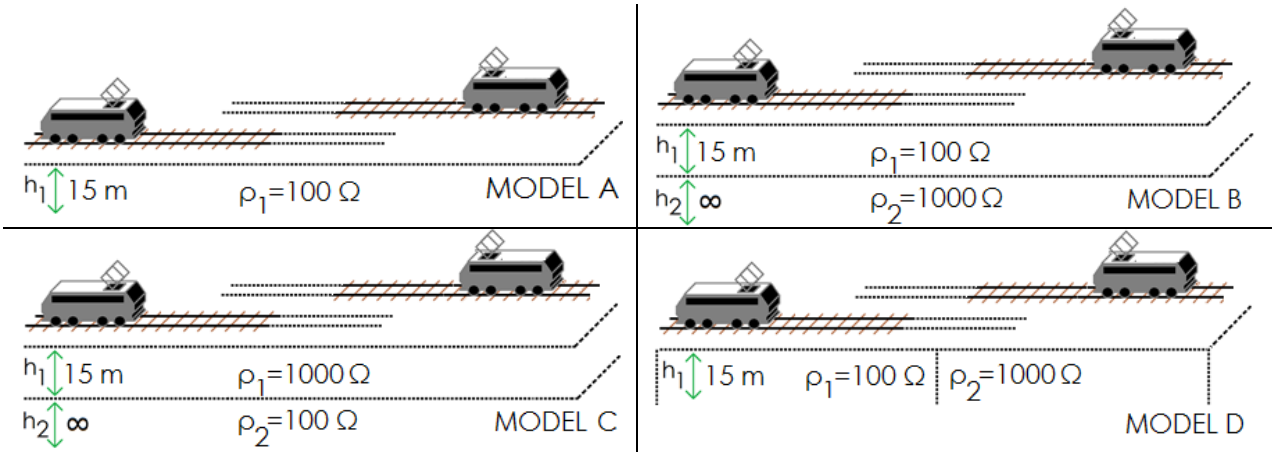
Obr.14 Model simulujúci dvojkoľajovú trať

Výsledky simulácií pozostávajú z celkovo 8 modelových situácií pre rovnakú rýchlosť elektrických vozidiel a vybraných 4 modelových situácií pre rôznu rýchlosť elektrických vozidiel, ktoré boli zamerané na vyhodnotenie vplyvu jednotlivých pôdnych modelov a v rámci nich porovnávali priebehy hodnôt pre uzemnené a neuzemnené sústavy. Modelové situácie sú znázornené na obr.15 a v

tab.1. V dvojvrstvovom modeli je v horizontálnom smere pôda modelovaná ako homogénny ekvivalentný model.

Tab.1 Topológia pôdnych modelov

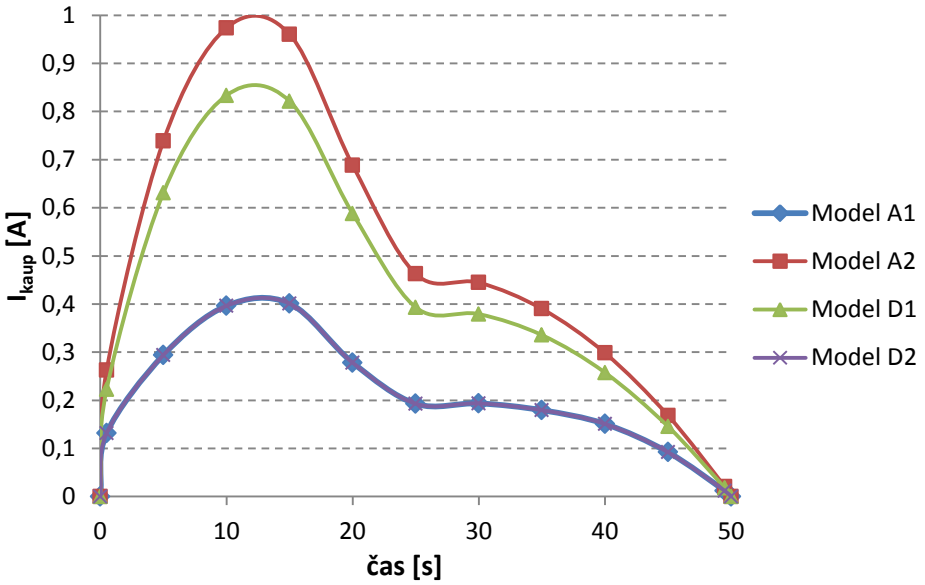
pôda	Model A1	homogénna - 100 ohm.m, neuzemnená sústava
	Model A2	homogénna - 100 ohm.m, uzemnená sústava
	Model B1	dvojvrstvová - 100/1000 ohm.m, neuzemnená sústava
	Model B2	dvojvrstvová - 100/1000 ohm.m, uzemnená sústava
	Model C1	dvojvrstvová - 1000/100 ohm.m, neuzemnená sústava
	Model C2	dvojvrstvová - 1000/100 ohm.m, uzemnená sústava
	Model D1	vertikálna - 100/1000 ohm.m, neuzemnená sústava
	Model D2	vertikálna - 100/1000 ohm.m, uzemnená sústava
	hrúbka vrchnej vrstvy	15 m



Obr.15 Principiálne znázornenie simulovaných pôdnych modelov

Výsledky simulácií dvojkoľajovej trate pre rozdielnu rýchlosť pohybu vozidiel

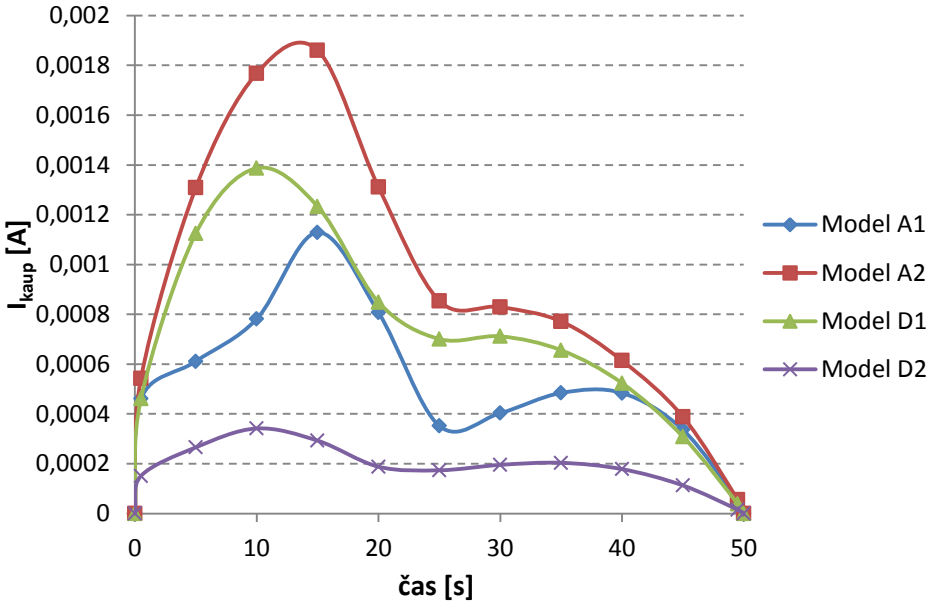
Elektrické vozidlá sa pohybujú rozdielnymi rýchlosťami, pričom rýchlosť vozidla 1 je 40 $m.s^{-1}$, rýchlosť vozidla 2 je 20 $m.s^{-1}$. Prvé vozidlo tak prejde úsek s dĺžkou 1000 m za čas 25 sekúnd a druhé prejde úsekom za 50 sekúnd.



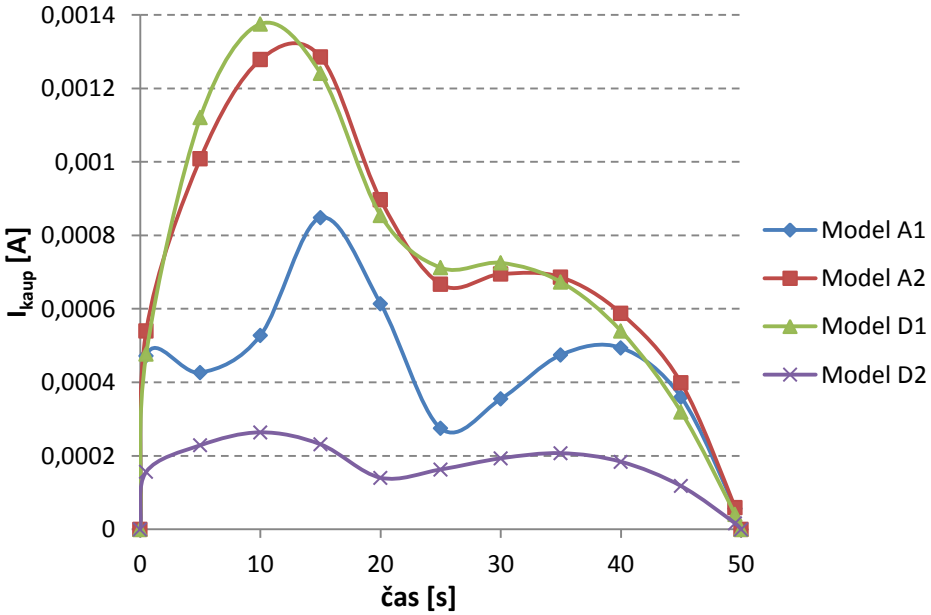
Obr.16 Kumulatívna absolútna hodnota unikajúcich prúdov v sústave v modelových situáciách pre rozdielne rýchlosti pohybu vozidiel

Na simuláciu bol vybraný model A1 a A2, čo sú modely s homogénnou pôdou s rezistivitou 100 Ω.m a model D1 a D2, ktorý je v strede trate vertikálne rozdelený na pôdu s rezistivitou 100 Ω.m a

1000 Ω.m. Súčet všetkých unikajúcich prúdov v sústave pre jednotlivé časové okamihy je zobrazený na obr.16. Kumulatívnu absolútnu veľkosť unikajúcich prúdov môžeme charakterizovať ako hodnotu, ktorá je súčtom všetkých parciálnych prúdov unikajúcich zo stanovených objektov pre každý krok simulácie. Na grafe na obr.17 je zobrazený priebeh kumulatívnej absolútnej hodnoty unikajúcich prúdov pre oba zemné kolektory a pre potrubie na obr.18.



Obr.17 Kumulatívna absolútna hodnota unikajúcich prúdov z kolektora v modelových situáciách pre rozdielne rýchlosti pohybu vozidiel



Obr.18 Kumulatívna absolútna hodnota unikajúcich prúdov z kolektora v modelových situáciách pre rozdielne rýchlosti pohybu vozidiel

Získané priebehy kumulatívnej absolútnej hodnoty unikajúcich prúdov sú dôležité z dôvodu vypočtu veľkosti elektrického náboja, ktorý opustí kovové zariadenie a urýchli tak proces prirodzenej korózie. Celkový náboj počas 1 cyklu, resp. pre 1 priebeh simulácie získame integráciou po krivke, ktorej výsledkom je obsah oblasti pod krivkou. Ak stanovíme, že cyklus sa pri reálnej prevádzke zopakuje každých 5 minút, ročne to predstavuje 105120 cyklov. Z celkového uniknutého náboja vieme následne vypočítať rýchlosť korózie objektu.

Tab.2 Rýchlosť korózie a úbytok na priemere výstuže pre vybrané modely

Koľaj				
	Model A1	**Model A2**	**Model D1**	**Model D1**
Q [C] - 1 cyklus	11,15	26,10	22,33	11,15
Q [C/rok]*	1172349,60	2744085,14	2347481,19	1172347,32
Kor_r [g/rok]	169,67	397,15	339,75	169,67

Koľajové lôžko				
	Model A1	**Model A2**	**Model D1**	**Model D1**
Q [C] - 1 cyklus	0,028	0,0496	0,038	0,0101
Q [C/rok]*	2942,121	5213,371	4032,847	1059,758
Kor_r [g/rok]	0,426	0,755	0,584	0,153

Potrubie				
	Model A1	**Model A2**	**Model D1**	**Model D1**
Q [C] - 1 cyklus	0,023	0,0387	0,0387	0,009
Q [C/rok]*	2417,235	4063,756	4071,684	945,637
Kor_r [g/rok]	0,350	0,588	0,589	0,135

* - počas doby 1 roka opakovanie cyklu 105120 krát (5 minútové intervaly)

Ak je oceľ v pasívnom stave, korózna rýchlosť je menšia ako 0,1 μm za rok a korózia je rovnomerná po celom povrchu. V aktívnom stave je korózna rýchlosť väčšia ako 10 μm za rok a aktivácia je lokálna, čo znamená vytváranie nerovnomerného korózneho poškodenia na povrchu materiálu. Z technického hľadiska je prijateľná priemerná korózna rýchlosť spôsobujúca zmenšovanie priemeru železobetónovej výstuže medzi 1 a 2 μm za rok, čo odpovedá životnosti konštrukcie približne 100 rokov. [8]

Z výsledkov simulácií vyplýva, že oceľ použitá vo výstuži koľajového lôžka by sa pri podmienkach nastavených v simulácii nachádzala v pasívnom stave a zmena priemeru by sa pohybovala v rádoch stotín mikrometra za rok. Takýto úbytok nepredstavuje v žiadnom z prezentovaných modelov riziko ohrozenia prevádzky ani riziko predčasného zníženia životnosti jednotlivých kovových častí. Tab.2 obsahuje vypočítané hodnoty veľkosti uniknutého náboja pri 1 cykle za obdobie 1 roka a tiež vyhodnotenie koróznej rýchlosti prebiehajúcej na kovových materiáloch.

2.3 Odporúčania na obmedzenie vzniku blúdivých prúdov vyplývajúce zo simulácií na rezistívnom 2D modeli

- aplikácia izolačných podložiek uložených medzi koľajnicu a podval;
- udržiavanie dobrého technického stavu koľajníc a ich pravidelná kontrola najmä na exponovaných miestach ako sú priecestia, ktoré sú v zimnom období posypávané cestárskou soľou;
- pravidelná optická kontrola stavu izolácie koľajníc a merania izolačného odporu koľajníc;
- udržiavanie nízkeho odporu spätného vedenia inštaláciou pozdĺžnych prepojov (koľajnicové prepojky) medzi jednotlivými koľajnicami, alebo ich zváraním z dôvodu vyrovnania potenciálu;
- zvýšením počtu pozdĺžnych prepojok v stúpaniach trate, úsekoch v blízkosti trakčných napájacích staníc a miestach s veľkou trakčnou záťažou;
- zosilnenie spätného vedenia trakčného prúdu;
- aplikácia priečnych medzikoľajnicových a medzikoľajových prepojok na zabezpečenie spojitosti dráhy spätného trakčného prúdu;
- zvýšený monitoring miest, v ktorých dochádza k zmene topológie systému;
- uloženie podzemných konštrukcií do pôd s vysokou rezistivitou;

- uloženie dlhých podzemných/nadzemných konštrukcií mimo koridor elektrickej trakcie;
- rozdelenie dlhých podzemných/nadzemných kovových objektov na kratšie úseky izolované izolačnými spojkami;
- izolácia vodovodných potrubí, plynovodov a iných vodivých objektov od styku s okolitým prostredím;
- aplikácia katodických ochrán na zariadenia vystavené nadmernému pôsobeniu blúdivých prúdov;
- dôsledná príprava projektu spojená s koróznym prieskumom, ktorá berie do úvahy zmeny vlastností pôdy počas ročných období;
- izolácia zápornej zbernice trakčnej napájacej stanice od zeme (neuzemnené systémy);
- aplikácia prepäťových ochrán najmä pri neuzemnených systémoch, kde dochádza k vývinu plávajúceho potenciálu voči zemi;
- udržanie jednotného napätia susedných trakčných napájacích staníc z dôvodu minimalizácie poklesu napätia po dĺžke koľajníc a s tým spojenej redukcie vzniku blúdivých prúdov;
- aplikácia zemného kolektora na miestach, kde nie je možné iným spôsobom zasahovať do systému elektrickej trakcie;
- použitie materiálu s čo najlepšími vodivými vlastnosťami;
- umiestnenie zberacieho zariadenia (kolektora) do blízkosti chráneného objektu;
- správny výber trasy pod zemou uložených potrubí - umiestnenie mimo oblasť vplyvu pôsobenia elektrickej trakcie, alebo do hĺbky, v ktorej pôda dosahuje vysokú rezistivitu;
- zvýšenie efektivity využitím mrežových sietí pospájaných kolektorom izolovaným od okolitej pôdy;
- zmenšenie vzdialeností medzi susedných napájacími stanicami;
- obmedzenie veľkosti trakčných prúdov zvýšením prevádzkového napätia;
- využívanie neuzemnených sústav v prípade dôrazu kladeného na obmedzenie veľkosti blúdivých prúdov;
- využívanie uzemnených sústav v prípade dôrazu na ochranu zariadení a osôb pred prepätiami;
- častejší monitoring železobetónových stavieb.

Záver

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo popísať javy spojené so vznikom, šírením a vplyvmi blúdivých prúdov vznikajúcich ako následok prevádzky elektrickej trakcie.

V úvodnej kapitole je spracovaná problematika elektrifikácie elektrickej trakcie v rámci Európy a Slovenska. Kapitola sa detailnejšie zaoberá témami napájania, uzemnenia a konštrukcie spätnej prúdovej cesty, ktoré sú najvýznamnejšie z hľadiska vzniku blúdivých prúdov. Téma napájania spracúva najčastejšie využívané trakčné sústavy s uvedením ich výhodných a nevýhodných vlastností a porovnáva jednosmernú a striedavú elektrickú trakciu. Primárnou funkciou uzemňovacieho systému v elektrickej trakcii je vytvoriť cestu pre spätný prúd. Spoločne s kvalitou technickej realizácie spätnej prúdovej cesty, vhodným dizajnom napájacej sústavy a s pravidelnou údržbou, je možné minimalizovať vznik blúdivých prúdov.

Kapitola 2 je zameraná na samotný vznik blúdivých prúdov a zhodnotenie ich vplyvov na objekty nachádzajúce sa v blízkosti elektrifikovaných tratí. Blúdivé prúdy urýchľujú procesy prirodzenej korózie a vystavujú tak železobetónové konštrukcie predčasnému starnutiu a zhoršovaniu ich mechanických vlastností, preto je potrebný ich pravidelný monitoring. V tomto smere je korózny prieskum komplexným riešením, ktorý poskytuje prehľad o veľkosti blúdivých prúdov v etape návrhu a realizácie výstavby, ale aj po jej samotnom dokončení.

Hlavným výstupom dizertačnej práce je model popisujúci správanie spätného trakčného prúdu. Na vytvorenie modelu bolo v prvom kroku nutné pochopiť, akým spôsobom je možné interpretovať model pôdy a akým spôsobom ovplyvňuje rezistivita pôdy šírenie prúdov v zemi. Možnosti prezentovaného rezistívneho 2D modelu sú obmedzené na modelovanie homogénnych a dvojvrstvových pôd. Komplikovanejšie geometrické tvary a viacvrstvové a modely pôdy je možné vytvoriť a simulovať v 3D simulačných programoch.

Samotný rezistívny 2D model predstavuje veľmi dobrý kompromis medzi jednoduchosťou zostavenia modelu a jeho presnosťou. Simulácie boli zamerané na kvantifikáciu veľkosti blúdivých prúdov, ktoré vznikajú pri rôznych zapojeniach napájacej sústavy, pri zmene parametrov spätnej prúdovej cesty, vplyvu rezistivity a topológie modelu pôdy a vplyvu vodivých objektov uložených v zemi. Z výstupov jednotlivých simulácií je možné vytvoriť súbor odporúčaní, ktoré by pomohli obmedziť veľkosť blúdivých prúdov.

Najdôležitejším parametrom je veľkosť izolačného odporu medzi koľajnicami a zemou. Ak zvod koľajníc voči zemi nepresiahne vďaka použitiu izolačných vložiek umiestnených medzi koľaj a podval hodnotu G=0,2 S/km, materiál vyhotovenia podvalov nie je podstatný z hľadiska úniku blúdivých prúdov smerom do zeme. Porovnanie uzemnených sústav s neuzemnenými sústavami jednoznačne preukazuje výhody neuzemnených systémov, ktoré spočívajú v približne polovičnej produkcii blúdivých prúdov. Množstvo generovaných blúdivých prúdov sa dá ovplyvniť aj zmenou pozdĺžneho odporu koľajníc, teda zväčšením a zmenšením prierezu koľajnice. Pri zmenšení prierezu koľajnice došlo v simulovanom modeli k zdvojnásobeniu veľkosti prúdov unikajúcich do zeme. Zmena prierezu sa prejavila rovnakým spôsobom v uzemnenej aj neuzemnenej sústave.

Veľkosti blúdivých prúdov v rôznych hĺbkach ovplyvnených uložením vodivého objektu (potrubia) boli vyhodnotené v kapitole 4.3. Hĺbka uloženia nemá významný vplyv na veľkosť prúdov unikajúcich zo spätného vodiča a z potrubia. To isté je možné povedať aj o zmene veľkosti prierezu potrubia, kedy 10 násobné zväčšenie prierezu spôsobilo zväčšenie hodnôt blúdivých prúdov o maximálne 10 %. Pre lepšie pochopenie správanie prúdov v nesymetrickom modeli bol vytvorený scenár, v ktorom bolo 500 m dlhé potrubie umiestnené medzi 1000 m - 500 m od trakčnej napájacej stanice. Toto usporiadanie spôsobilo lokálne zvýšenie veľkosti prúdov unikajúcich z potrubia vo

vzdialenosti 500 m od napájacej stanice čo znamená, že potrubie je v tomto mieste vystavené rýchlejšiemu tempu korózie ako v jeho ostatných častiach.

Vplyv rezistivity pôdy sa pri simuláciách ukázal ako zásadný faktor ovplyvňujúci vznik blúdivých prúdov. Pôdy s veľkou rezistivitou prispievajú udržaniu veľkého odporu medzi koľajnicou a zemou. Vysoká rezistivita pôdy zabraňuje šíreniu blúdivých prúdov do väčších hĺbok a prúdy majú tendenciu po opustení koľajníc o návrat naspäť do koľajníc čo najkratšou cestou. Potenciál koľajníc uložených na vysoko rezistívnej pôde však môže prekročiť dovolené dotykové hodnoty potenciálu, preto je potrebné priebeh potenciálov pravidelne kontrolovať. Pôdy s nízkou rezistivitou umožňujú distribúciu prúdov do veľkých hĺbok.

Prípadová štúdia v kapitole 4.4 mala za cieľ zhodnotiť vplyv zmien ročných období na veľkosť blúdivých prúdov. Porovnanie bolo vytvorené pre mesiace február a november, v ktorých hodnota odporu uzemnenia predstavovala opačné extrémy hodnôt v sledovanom období. Simuláciou bolo úspešne dokázané, že zmena v rámci ročných období môže v ekvivalentných modeloch spôsobiť 10 až 15 % nárast veľkosti blúdivých prúdov a potenciálu na koľajniciach voči zemi.

Ak nie je možné vykonať zásah do napájacej sústavy, alebo do spätnej prúdovej cesty a korózia blúdivými prúdmi predstavuje nebezpečenstvo pre zariadenia nachádzajúce sa v blízkosti trate, využíva sa tzv. zemný kolektor. V simulácii v kapitole 4.5 bol použitý neizolovaný kolektor uložený pozdĺž trate a pripojený k zápornému pólu trakčnej napájacej stanice. Kolektor sa ukázal ako vhodné riešenie obmedzujúce veľkosť blúdivých prúdov, pričom efektivita kolektora rastie so zväčšovaním jeho priemeru a tiež so zvyšovaním rezistivity pôdy.

Na modeli vytvorenom v kapitole 4.6 dokážeme simulovať dvojkoľajový systém. Cieľom modelu bolo vyhodnotiť veľkosť blúdivých prúdov pre jednotlivé prevádzkové situácie a pre rôzne modely pôdy. Modely pôdy boli v pozdĺžnom smere vytvorené ako symetrické aj nesymetrické, elektrické vozidlá sa pohybovali rovnakou, alebo rôznou rýchlosťou. Výsledkom simulácie bolo vyhodnotenie celkového kumulatívneho náboja, ktorý počas pohybu vozidiel po trati unikal zo všetkých kovových objektov, z ktorého bola následne vypočítaná rýchlosť korózie jednotlivých častí trakčného systému. Výpočty, ktoré kvantifikovali množstvo železa uvoľneného pri korózii určili, že pri simulovanom zapojení nedochádza k takým vplyvom blúdivých prúdov, ktoré by znamenali skrátenie reálnej životnosti častí systému.

Prínosy dizertačnej práce spočívajú:

- v komplexnej analýze napájania, uzemňovania a technickej realizácie spätnej prúdovej cesty elektrickej trakcie,
- vo vytvorení rezistívneho 2D modelu popisujúceho šírenie spätného trakčného prúdu v elektrickej trakcii,
- v analýze pôdnych modelov a aplikácii homogénneho a dvojvrstvového modelu do rezistívneho 2D modelu,
- vo vyhodnotenie rýchlosti korózie kovových častí zariadení modelovaného systému,
- vo vytvorení odporúčaní na obmedzenie veľkosti blúdivých prúdov generovaných elektrickou trakciou.

Vybraný zoznam literatúry

[1] Corrosionpedia. Stray Current: [online] [Dátum: 19. 1. 2015] http://www.corrosionpedia.com/definition/1032/stray-current.

[2] DEKKER, M. J.: Stray Current Control - An Overview of Options. 1999. Inst. Elect. Eng. Seminar.

[3] Office of Rail Regulation - ORR. Design standards stray current management - Tramway Technical Guidance Note 3: [online] [Dátum: 21. 1. 2015] http://orr.gov.uk/__data/assets/pdf_file/0012/5070/TTGN3.pdf.

[4] OGUNSOLA, A. a MARISCOTTI, A.: Electromagnetic Compatibility in Railways - Analysis and Management. Berlin : Springer, 2013. s. 528. ISBN 978-3-642-30280-0.

[5] Witt Industrial Electronics. Potential and Stray Current Monitoring. Witt-solutions. [online] [Dátum: 2. 6. 2015.] Dostupné na internete: http://en.witt-solutions.de/rail/systems-for-direct-current-railways/potential-and-stray-current-monitoring/.

[6] KOUDELKA, C.: Bludné proudy. Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, s. 12, [online] Dostupné na internete: http://fei1.vsb.cz

[7] CHARALAMBOUS, C.A., COTTON, I. a AYLOTT, P.: A Simulation Tool to Predict the Impact of Soil Topologies on Coupling Between a Light Rail System and Buried Third-Party Infrastructure, Iss. 3, s.l. : IEEE, 2008, Vehicular Technology, Zv. Vol. 57, s. 1404-1416.

[8] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Koroze v betonu. Korozní inženýrství. [online] [Dátum: 28. 6. 2015] Dostupné na internete: http://old.vscht.cz

[9] CERMAN, A., JANÍČEK, F., KUBALA, M.: Resistive-type network model of stray current distribution in railway DC traction system. In Electric power engineering 2015 : 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE). Kouty nad Desnou, Czech Republic. May 20-22, 2015. Ostrava : VSB - Technical University of Ostrava, 2015, S. 364-368. ISBN 978-1-4673-6787-5.

[10] CERMAN, A., JANÍČEK, F.: 2-D simulation of distribution of stray current in soil generated by the DC railway traction. In ELITECH´15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4358-7.

[11] CERMAN, A., JANÍČEK, F., HALÁN, I., ADAILEH, A.: 2-D Model of Stray Current Distribution in Railway DC Traction System. In Elektroenergetika 2015 : 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 16-18, 2015. Košice : Technical University of Košice, 2015, (In press)

[12] JANÍČEK, F., CERMAN, A., KOVÁČ, M.: Effects of soil properties and grounding schemes on stray current in DC rail system. In EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 174-177. ISSN 1335-2547.

[13] JANÍČEK, F., CERMAN, A.: Impact of soil properties on potential distribution within and outside of an earthing system. In Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 45-48. ISBN 978-80-89402-69-4.

Publikácie autora

AAA Vedecké monografie vydané v zahraničných vydavateľstvách

[1] JANÍČEK, František - SMITKOVÁ, Miroslava - BOŽEK, Pavol - KULTAN, Jaroslav - BACHMAČUK, Sergij - KUBICA, Juraj - CERMAN, Anton. *Energija - nastojaščeje i buduščeje*. 1. vyd. Ostrava : AMOS, 2014. 207 s. Dostupné na internete: <https://is.stuba.sk/vv/pub_priloha.pl?id=303103>. ISBN 978-80-904766-2-2.

AAB Vedecké monografie vydané v domácich vydavateľstvách

[2] JANÍČEK, František - LIŠKA, Martin - CERMAN, Anton - JANÍČEK, Michal. *Komplexná analýza solárnych elektrární*. 1. vyd. Pezinok : Renesans, 2014. 68 s. ISBN 982-80-89402-75-5.

ACB Vysokoškolské učebnice vydané v domácich vydavateľstvách

[3] JANÍČEK, František - ARNOLD, Augustín - ŠEDIVÝ, Juraj - ŠULC, Igor - CERMAN, Anton - PETREK, Peter. *Elektrické stanice*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012. 189 s. ISBN 978-80-227-3678-7.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

[4] CERMAN, Anton - JANÍČEK, František - KUBALA, Milan. Resistive-type network model of stray current distribution in railway DC traction system. In *Electric power engineering 2015 : 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE). Kouty nad Desnou, Czech Republic. May 20-22, 2015*. Ostrava : VSB - Technical University of Ostrava, 2015, S. 364-368. ISBN 978-1-4673-6787-5.

[5] HLAVÁČ, Pavol - KOVÁCS, Zoltán - KUBALA, Milan - ŠPOK, Marek - CERMAN, Anton. Full scope risk monitor for the transmission grid. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014*. 1. vydanie. Brno : Brno University of Technology, 2014, s. 63-68. ISBN 978-1-4799-3806-3.

[6] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - PERNÝ, Milan - BRILLA, Igor - MARKO, Ľubomír - MOTYČÁK, Štefan. Applications of superconducting quantum interference devices. In *Electric power engineering 2015 : 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE). Kouty nad Desnou, Czech Republic. May 20-22, 2015*. Ostrava : VSB - Technical University of Ostrava, 2015, S. 429-432. ISBN 978-1-4673-6787-5.

[7] JANÍČEK, František, et al. E-learning project–power engineering dictionary. Distance Learning, Simulation and Communication 2015, 2015, 58.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

[8] CERMAN, Anton - JANÍČEK, František. 2-D simulation of distribution of stray current in soil generated by the DC railway traction. In *ELITECH´15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4358-7.

[9] CERMAN, Anton - JANÍČEK, František - HALÁN, Igor - ADAILEH, Ayid. 2-D Model of Stray Current Distribution in Railway DC Traction System. In Elektroenergetika 2015 : 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 16-18, 2015. Košice : Technical University of Košice, 2015, (In press)

[10] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KOVÁČ, Matúš. Effects of soil properties and grounding schemes on stray current in DC rail system. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014*. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 174-177. ISSN 1335-2547.

[11] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton. Impact of soil properties on potential distribution within and outside of an earthing system. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 45-48. ISBN 978-80-89402-69-4.

[12] HAJDUČEK, Peter - CERMAN, Anton. Exergy Demand Analysis of Biomass Cogeneration Unit. In *ELITECH´13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-3947-4.

[13] CHOCHOL, Peter - CHRAPČIAK, Igor - JANÍČEK, František - BELÁŇ, Anton - CERMAN, Anton. The smart metering in Slovakia is smart grid ready. In *Power Engineering 2014. Control of Power Systems 2014 : Proceedings of the 11th International Scientific Conference CPS 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; 20-22 May 2014*. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 79-82. ISBN 978-80-89402-71-7.

[14] CHUDIVÁNI, Ján - KUJAN, Vladimír - HÜTTNER, Ľudovít - CERMAN, Anton. Meniče napätia a frekvencie pre napájanie synchrónnych motorov s permanentnými magnetmi. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou*

Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 170-173. ISSN 1335-2547.

[15] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KUBICA, Juraj. Are current myths in energy sector real? In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 9-12. ISBN 978-80-89402-69-4.

[16] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KÉRY, Július - HAJDUČEK, Peter. Unconventional Renewable Energy Sources. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.235-240. ISBN 978-80-89402-64-9.

[17] JANÍČEK, František - KÉRY, Július - CERMAN, Anton. Noise Reduction in Chosen Power Substation. In *Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013*. Košice : Technical University of Košice, 2013, s.164-167. ISBN 978-80-553-1441-9.

[18] JANÍČEK, František - POLJOVKA, Peter - CERMAN, Anton. Support of Energy Thinking in the Organization. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.217-220. ISBN 978-80-89402-64-9.

[19] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - MOTYČÁK, Štefan - HAJDUČEK, Peter. The Use of Published Literature on Teaching Students. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.229-234. ISBN 978-80-89402-64-9.

[20] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KUBICA, Juraj - LENĎÁK, Fedor. Možnosti nasadzovania obnoviteľných zdrojov do 10 kW v podmienkach bytovej výstavby. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : konferencia ELOSYS, Trenčín, 15.-18.10.2013*. Roč. 19, mimoriadne č (2013), s.124-127. ISSN 1335-2547.

[21] JANÍČEK, František - ADAILEH, Ayid - CERMAN, Anton. Jordan renewable energy potential. In *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 81-84. ISBN 978-80-89402-73-1.

[22] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KUBICA, Juraj. Vybrané aspekty záverov 22. Svetového energetického kongresu v Daegu. In *Wood, Pulp and Paper 2014, Polygrafia Academica 2014 - WPP a PA 2014 : vedecká konferencia. Bratislava, Slovensko, 12-13 marca 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská chemická knižnica, 2014, S. 245-249. ISBN 978-80-89597-16-1.

[23] JANÍČEK, František - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - CERMAN, Anton - FARKAS SMITKOVÁ, Miroslava - ZUŠČÁK, Jozef - HALÁN, Igor. Step by step to the world of energy by eLearning technologies. In *ICETA 2014 [elektronický zdroj] : 12th IEEE International Conference on Engineering eLearning Technologies and Applications. December 4-5, 2014 Starý Smokovec, Slovakia*. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2014, CD ROM, s. 63-68. ISBN 978-1-4799-7738-3.

[24] JANÍK, Matej - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - PÍPA, Marek - CINTULA, Boris - CERMAN, Anton. Use of the Visibility Level Method for Evaluation of Glare in Traffic. In *LUMEN V4 : 4. konferencia Vyšehradských krajín pre osvetlenie. Bratislava, Slovensko, 26.-28. 9. 2012*. Bratislava : KONGRES Management, 2012, s.361-366. ISBN 978-80-89275-32-8.

[25] SEIDO, Ferati - JANÍČEK, František - CERMAN, Anton. Concept and economic efficiency analysis for the alternative energy supply at the example of a reference building. In *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 71-74. ISBN 978-80-89402-73-1.

[26] ŠÁLY, Vladimír - PERNÝ, Milan - ĎURMAN, Vladimír - MIKOLÁŠEK, Miroslav - VÁRY, Michal - CERMAN, Anton. DC and AC electric characterization of thin a-SiC layers for photovoltaic applications. In *Journal of Electrical Engineering : Digest of papers presented at Power Engineering 2014 Conference*. Vol. 65, No. 7s (2014), s. 38-41. ISSN 1335-3632.

BAB Odborné monografie vydané v domácich vydavateľstvách

[27] FARKAS SMITKOVÁ, Miroslava - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - HOLJENČÍK, Jozef - HALÁN, Igor - ZUŠČÁK, Jozef - CERMAN, Anton. *Energetický slovník pre základné a stredné školy*. 1. vyd. Nitra : Nitrianske tlačiarne, 2014. 200 s. ISBN 978-80-227-4274-0.

[28] JANÍČEK, František - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - FARKAS SMITKOVÁ, Miroslava - HOLJENČÍK, Jozef - CERMAN, Anton - ZUŠČÁK, Jozef - HALÁN, Igor. *Tajomný svet energie* [elektronický zdroj]. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014. CD ROM, [interaktívny obsah]. ISBN 978-80-227-4281-8.

BDE Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

[29] JANÍČEK, František - ŠČEPÁNEK, Michal - BELÁŇ, Anton - CHRAPČIAK, Igor - CERMAN, Anton - LENĎÁK, Fedor. Roadmap for smart metering in the Slovak Republic. In *Energetika*. Roč. 64, č. 3 (2014), s. 156-162. ISSN 0375-8842.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

[30] BELÁŇ, Anton - VOLČKO, Vladimír - HERETÍK, Pavol - KOVÁČ, Matúš - CINTULA, Boris - VIGLAŠ, Dominik - CERMAN, Anton. Model fotovolticého článku. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 6, č. 10 (2013), s.online [12] s. ISSN 1338-0087.

[31] BELÁŇ, Anton - VOLČKO, Vladimír - HERETÍK, Pavol - KOVÁČ, Matúš - CINTULA, Boris - VIGLAŠ, Dominik - CERMAN, Anton. Vývoj veternej energetiky v Európe. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 6, č. 4 (2013), s.online [6] s. ISSN 1338-0087.

[32] BELÁŇ, Anton - CINTULA, Boris - VIGLAŠ, Dominik - HERETÍK, Pavol - KOVÁČ, Matúš - VOLČKO, Vladimír - CERMAN, Anton. Photovoltaic Cells Efficiency of Electricity Production. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 6, č. 9 (2013), s.online [6] s. ISSN 1338-0087.

[33] BELÁŇ, Anton - VIGLAŠ, Dominik - CINTULA, Boris - HERETÍK, Pavol - KOVÁČ, Matúš - VOLČKO, Vladimír - CERMAN, Anton. Internal Energy Market and Renewable Energy Sources. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 6, č. 5 (2013), s.online [7] s. ISSN 1338-0087.

[34] JANÍČEK, František - VOLČKO, Vladimír - CERMAN, Anton - CINTULA, Boris. Súčasný stav zavádzania Smart Grid vo svete a postavenie SR v tejto problematike. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. Roč. 19, č. 1 (2013), s.17-18. ISSN 1335-2547.

[35] JANÍČEK, František - BELÁŇ, Anton - CERMAN, Anton - HERETÍK, Pavol - KOVÁČ, Matúš - VOLČKO, Vladimír - CINTULA, Boris - VIGLAŠ, Dominik. Vývoj a trendy súčasnej hydroenergetiky. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 6. č. 7 (2013), s.online [7] s. ISSN 1338-0087.

[36] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KUBICA, Juraj. Sú súčasné mýty v energetike pravdivé? In *ATP Journal*. Roč. 21, č. 7 (2014), s. 30-33. ISSN 1335-2237.

BEF Odborné práce v domácich nerecenzovaných zborníkoch (konferenčných aj nekonferečných)

[37] JANÍČEK, František - ŠČEPÁNEK, Michal - BELÁŇ, Anton - CHRAPČIAK, Igor - CERMAN, Anton - LENĎÁK, Fedor. Roadmap for Smart Metering in the Slovak Republic. In *Energofórum 2013 : Čo ovplyvňuje ceny elektriny? Vyhne, 17.-18. 10. 2013* : Sféra, a.s., 2013, s.67-82. ISBN 978-80-971375-1-9.

[38] JANÍČEK, František - CERMAN, Anton - KUBICA, Juraj. Challenging the global myths in energy sector. In *ICMT 2014 : International Conference on Military Technologies and Special Technologies 2014. Bratislava, May 14, 2014*. Trenčín : Alexander Dubček University of Trenčin, 2014, s. 333-339. ISBN 978-80-8075-639-0.