

Magnetická pole v okolí elektrizovaných drah

prof. Ing. Josef Paleček, CSc, Ing. Petr Kačor, Ph.D.,
Ing. Martin Marek, Ph.D., Ing. Petr Orság, Ph.D.,
RNDr. Ctibor Henzl, Ph.D., Ing. Jiří Foldyna, Ph.D., VŠB-TU Ostrava

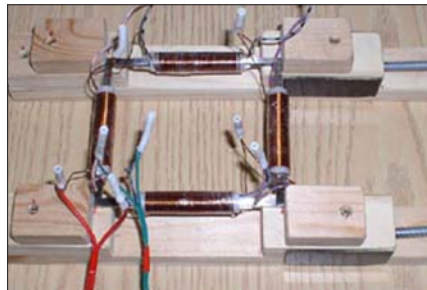
Úvod

Magnetická pole v okolí elektrotechnických zařízení působí jednak na živé organismy, jednak ovlivňují jiná technická zařízení, především výpočetní, sdělovací a monitorovací techniku.



Obr. 1. Trať elektrizovaná stejnosměrnou trakční soustavou 3 kV

Živé organismy tvoří z hlediska elektrotechniky nehomogenní dielektrické systémy, zčásti s elektrolytickou vodivostí, ve kterých probíhají složité biochemické pochody. Druhým významným faktorem je vznik bioelektrických potenciálů a vedení bioelektrických impulzů nervovými vlákny a jinými strukturami. Třetí charakteristikou důležitou pro uplatnění vlivu magnetických polí je neustálé proudění krve a jiných tekutin. Tato poznání vedla k vypracování norem limitujících



Obr. 2. Vzorky z materiálu kolejnice a jejich uložení v měřicím přípravku

intenzitu magnetických polí a délku pobytu v nich pro zaměstnance i ostatní veřejnost [9].

Magnetická pole tvoří tedy nedělitelnou součást životního prostředí. Proto je důležité alespoň orientačně znát jejich hodnoty, zvláště v okolí silových zařízení, která jsou zdrojem nejsilnějších polí, ve kterých se volně pohybují lidé.

V předkládaném příspěvku chceme čtenáře seznámit s některými výsledky řešení projektu GAČR č. 103/05/0660 Vliv elektrické vozby na životní prostředí, ve kterém jsme vyšetřovali magnetická pole v okolí elektrizovaných drah. Při vyšetřování jsme nejdříve sestrojili matematické modely, jejichž výsledky jsme ověřili experimentem.

Výchozí matematické vztahy pro řešení

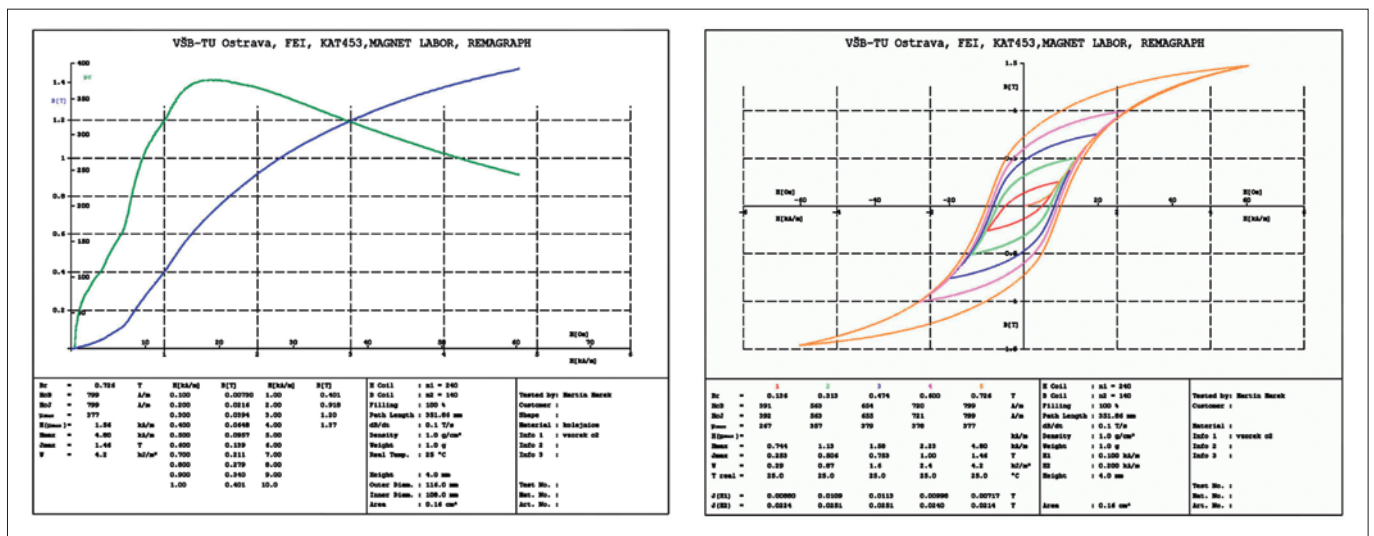
Obecně lze vztah mezi magnetickým polem a proudem, který ho vytváří, vyjádřit diferenciální rovnicí:

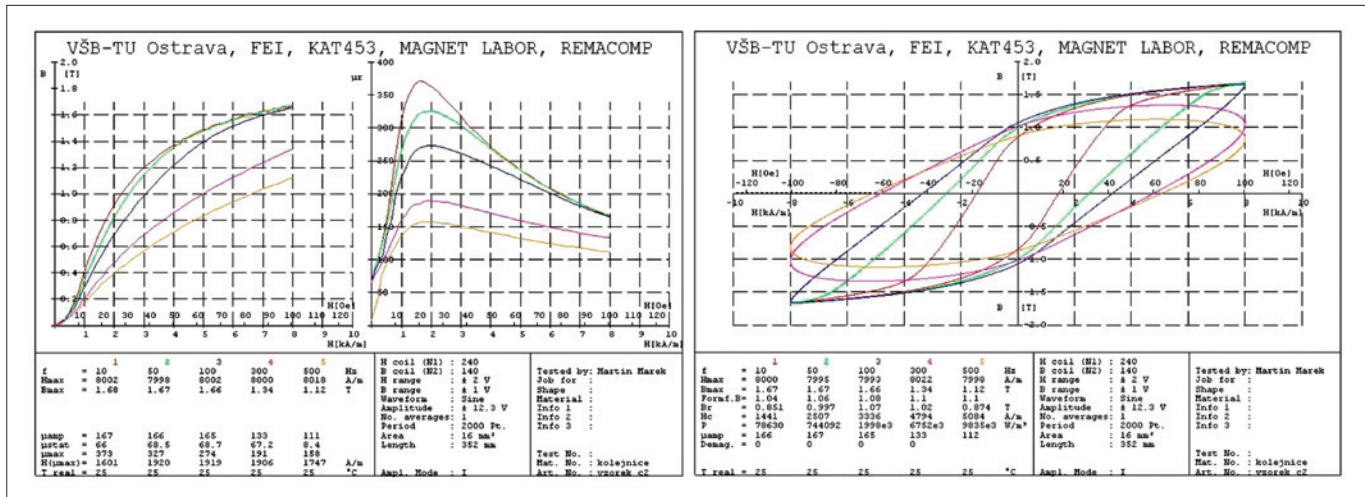
$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} A = J_{sc}$$

A – vektorový magnetický potenciál ($\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$)
 J_{sc} – proudová hustota ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
 μ – permeabilita prostředí, ve kterém magnetické pole vzniká ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)

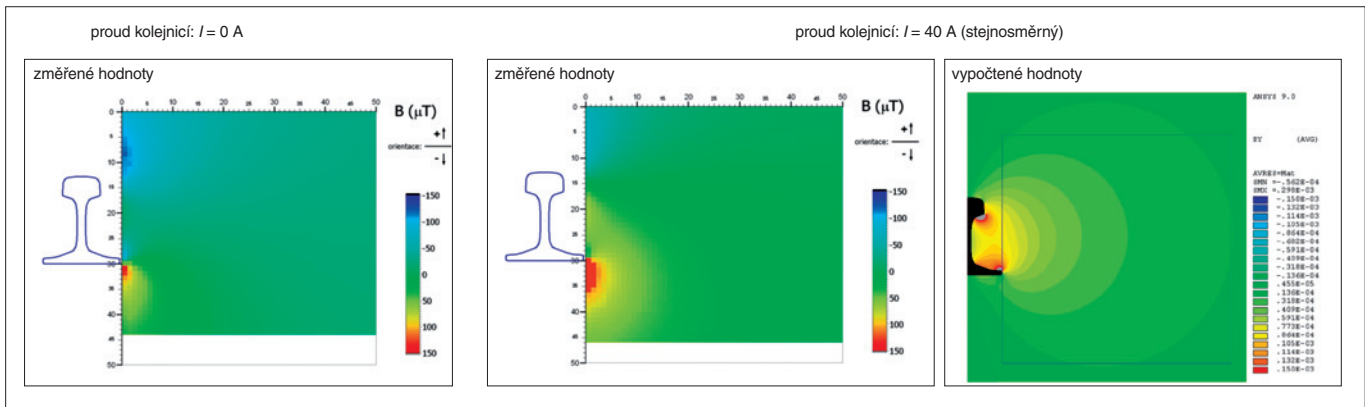


Obr. 3. Stanoviště pro měření magnetických vlastností konstrukčních materiálů





Obr. 5. AC magnetovací charakteristiky (vlevo) a AC hysterezní BH charakteristiky materiálu kolejnice (vpravo) pro frekvence $f = 10, 50, 100, 300$ a 500 Hz



Obr. 6. Rozložení magnetického pole v okolí osamocené kolejnice

Magnetická indukce B (T) je veličina odvozená z magnetického vektorového potenciálu a platí pro ní:

$$B = \text{rot } A$$

Všechna řešení magnetických polí vycházejí z uvedených vztahů. Řešení je možné provést jednak analyticky s přímým využitím Ampérova a Biot-Savartova zákona, např. s podporou programu MS Excel, jednak numericky metodou konečných prvků s podporou různých softwarů. V tomto článku jsou použity obě metody za účelem porovnání výsledků. Výsledky určené metodou konečných prvků byly získány s podporou programu Ansys s využitím infi-prvků. Ty umožňují definovat nulové hodnoty vektorového magnetického potenciálu v nekonečnu.

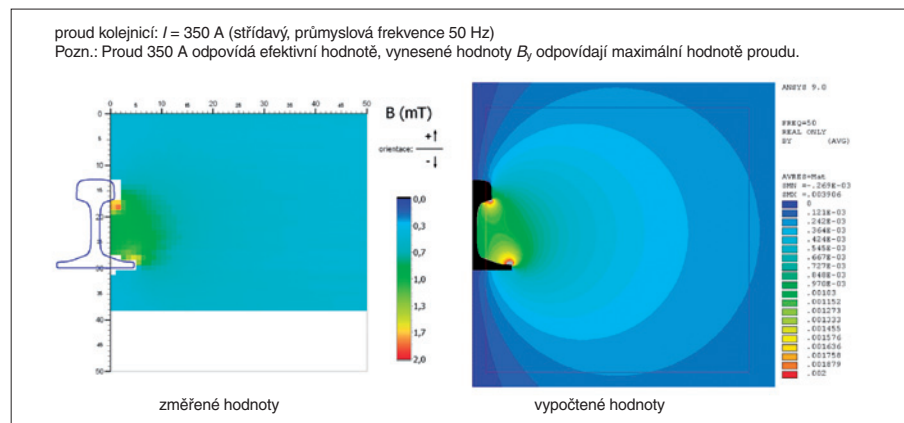
Magnetické vlastnosti materiálu kolejnic

Pro vyšetřování magnetických polí je potřebné znát magnetické vlastnosti jednotlivých prvků obvodu trakčního proudu – viz obr. 1. Trakční obvod je tvořen obvykle proudovým trolejovým vedením a zpětným kolejnicovým vedením. Specifikou trakčního obvodu je, že kolejnicové vedení není doko-

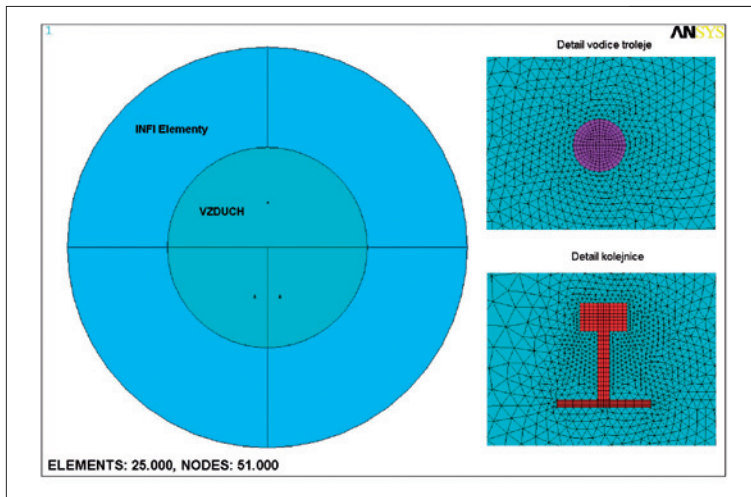
nale izolováno od země, a tím část trakčního proudu teče zemí a nepodílí se tedy na vytvoření magnetického pole v okolí elektrizované tratě.

Cílem měření popsaných v tomto odstavci bylo stanovit skutečné magnetické vlastnosti materiálů kolejnic různých typů, jsou-li vystaveny jednak stacionárním magnetickým polím, jednak dynamickým magnetickým polím o různých frekvencích. Za tímto účelem bylo proměřeno množství vzorků kolej-

nic. Všechny vzorky byly vyrobeny v podobě prutů orientovaných v podélném směru kolejnice se čtvercovým průřezem 5×5 mm a délkou 500 mm. Takto získané základní prutové vzorky materiálu kolejnic byly následně upraveny tak, aby z nich bylo možné sestavit magnetický obvod pro vlastní měření. Provedení připravených vzorků je patrné z obr. 2 nahoře. Pro vlastní měření byl připraven pevný cívkový systém s pomocným nemagnetickým upínacím rámem vyrobeným tak, aby



Obr. 7. Rozložení magnetického pole v okolí osamocené kolejnice pro střídavý proud 350 A



Obr. 8. Model jednokolejné tramvajové trati pro výpočet v programu Ansys

dou, rovněž pomocí rychlé karty DAQ. Pohled na měřicí stanoviště tohoto systému je na obr. 3.

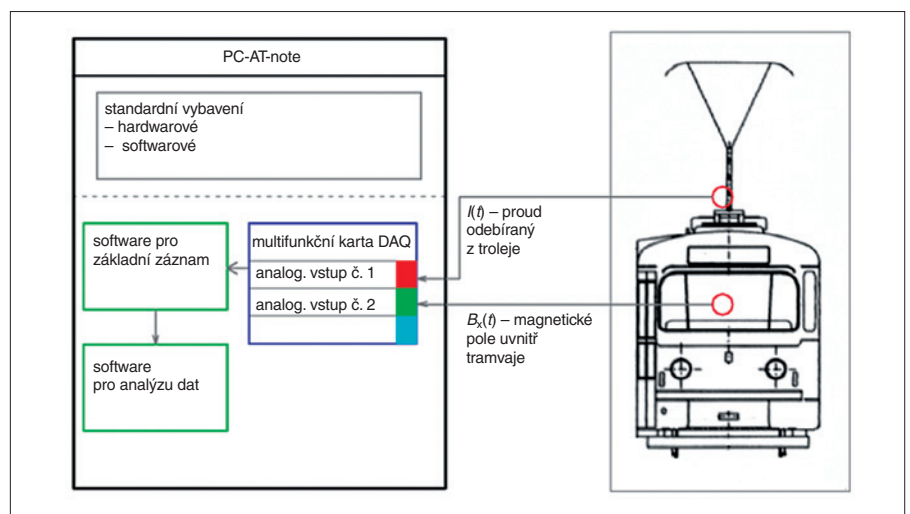
Stacionární magnetovací a BH charakteristiky byly pak měřeny na systému Remagraph. Princip měření stacionárních charakteristik s tímto systémem je do určité míry podobný principu nastíněnému u předešlého měření. Zásadní rozdíl je ve způsobu měření indukovaného napětí na sekundárních závitcích. Měření není provedeno osciloskopickou metodou, ale pomocí elektronických fluxmetrů, které korektně zaznamenávají všechny velmi malé přírůstky indukovaného napětí, vznikajícího při pozvolném zvyšování (snižování) budicího proudu po celou dobu měření jedné charakteristiky. Podrobnější popis metod a systé-



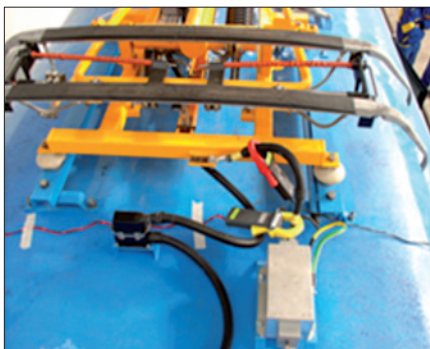
Obr. 9. Pohled na zkušební trať

bylo možné vzorky rychle vyměnit a dostatečně zařizovat magnetický obvod. Provedení měřicího rámu je na obr. 2 dole.

Samotné měření magnetických vlastností bylo provedeno pomocí specializovaných



Obr. 11. Blokové schéma uspořádání měřicího systému



Obr. 10. Měřicí přístroje použité při měření s tramvají

měřících systémů instalovaných v Laboratorii magnetických měření zřízené na Katedře elektrických strojů a přístrojů Vysoké školy báňské Technické univerzity Ostrava. Pro měření dynamických BH charakteristik byl použit digitální měřicí systém Remacomp, umožňující měřit dynamické magnetovací a BH charakteristiky v rozsahu frekvencí 1 až 10 kHz, s širokou možností nastavení parametrů a regulací při měření. Principiálně je měření tímto systémem založené na metodě měření na toroidu. Buzení primárního vinutí je zajištěno z bipolárního čtyřkvadrantového zesilovače řízeného pomocí multifunkční karty DAQ-PC. Vyhodnocování budicího proudu a indukovaného napětí je provedeno osciloskopickou meto-

mů měření magnetických vlastností překračuje rámec tohoto příspěvku. Některé další informace o uvedených měřících systémech lze nalézt na internetových stránkách laboratoře [12].

Některé výsledky měření magnetických vlastností pro jeden vzorek materiálu kolejnice (UIC-900A) jsou znázorněny na obr. 4 a obr. 5. Na obr. 4 jsou uvedeny změřené BH charakteristiky stacionární, které odpovídají buzení stejnosměrným proudem. Na obr. 5 jsou pak uvedeny BH charakteristiky dynamické (uvedena měření pro frekvence 10, 50, 100, 300 a 500 Hz).

Takto zjištěné magnetické vlastnosti materiálu kolejnice byly použity pro modelový výpočet rozložení magnetického pole. Přesněji

Tab. 1. Trolejové vedení

Trolejový drát	Průřez (mm ²)	Výška nad temenem kolejnice (m)
150 Cu	150	5,4

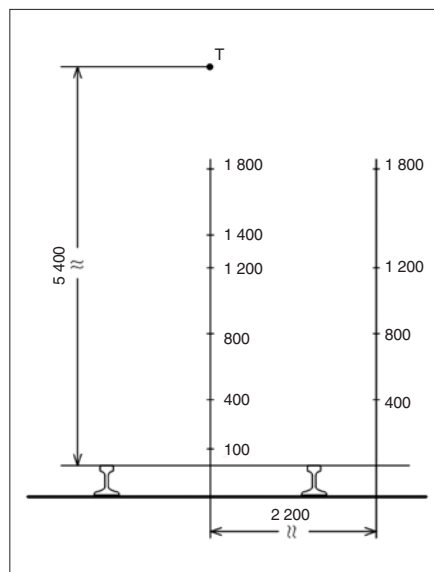
Tab. 2. Kolejnice

Kolejnice	Průřez (mm ²)	Rozchod koleje (mm)	Permeabilita (μ_r)
NT1	8 216	1 435	podle hodnot uvedených v kapitole Magnetické vlastnosti materiálu kolejnic

řečeno, pro výpočet rozložení stejnosměrného magnetického pole byla použita stacionární magnetizační BH charakteristika. Pro výpočet střídavých polí průmyslové frekvence amplitudová magnetizační charakteristika změřená pro frekvenci 50 Hz.

V rámci tohoto měření bylo vyšetřováno i magnetické pole v okolí osamocené kolejnice. Několik výsledků je na obr. 6 a obr. 7.

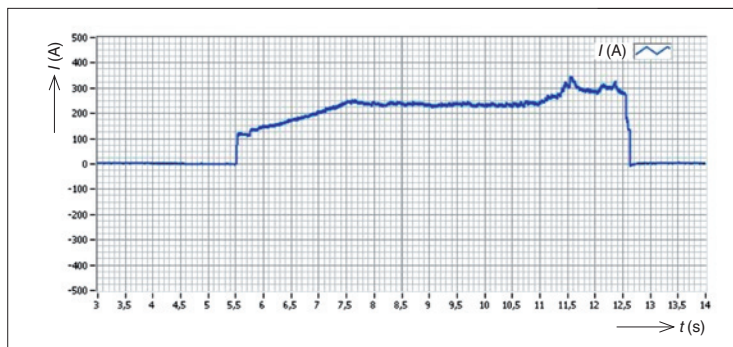
Při porovnávání výsledků dosažených měření a výpočtem je třeba se nejprve podívat na výsledky měření magnetického pole okolí



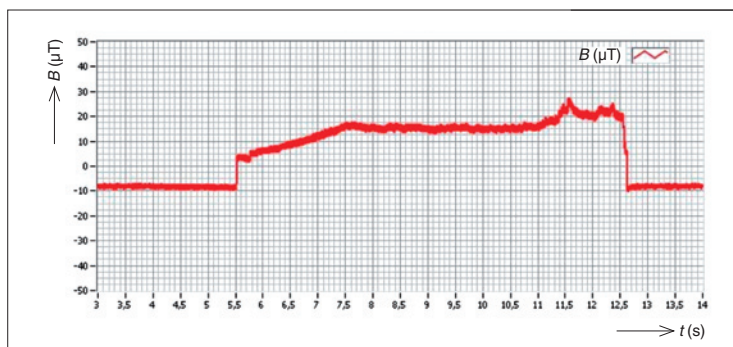
Obr. 12. Rozmístění měřicích bodů

kolejnice bez proudu. Z rozložení magnetického pole změřeného pro nulový proud kolejnic je patrný výrazný vliv remanentního magnetismu oceli kolejnice a ve větší vzdálenosti od kolejnice i vliv samotného magnetického pole Země (ve vzdálenosti 50 cm od kolejnice byly změřeny hodnoty mezi 15 až 25 μT).

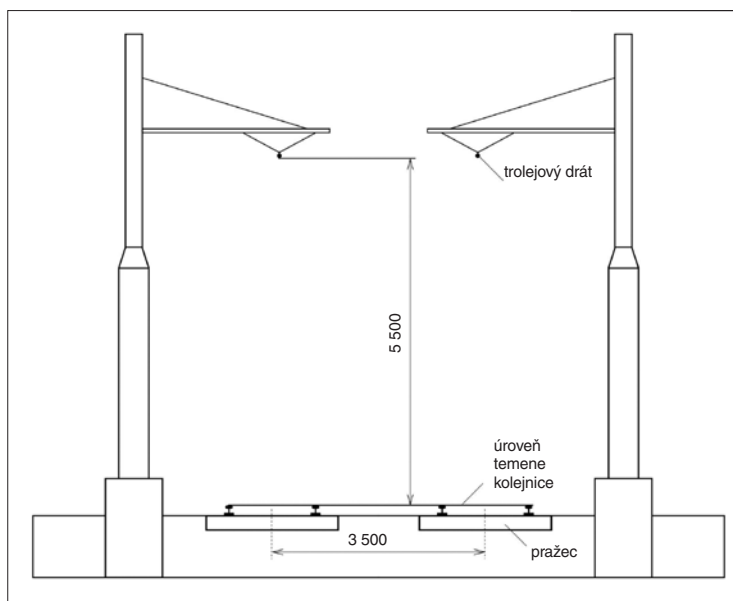
Porovnáme-li nyní výsledky rozložení magnetické indukce pro jednotlivé proudy získané měření a výpočtem, je podle barevných kontur pouhým okem patrná velmi dobrá shoda výsledků jak v rozložení, tak i ve velikosti hodnot magnetické indukce. Výraznější rozdíl rozložení vypočteného a změřeného magnetického pole je patrný pouze v oblasti velmi blízké kolejnici u hlavy a paty. Vysvětlení, proč právě v této oblasti se výsledky výpočtů a měření pro jednotlivé proudy výrazněji rozcházejí, dává právě měření magnetického pole kolejnice pro nulový proud. Z něj, jak již bylo uvedeno, je patrná značná úroveň remanentní magnetizace oceli kolejnice. Z výsledků výpočtu a měření pro střídavý proud 350 A je ale rovněž zřejmé, že pro vyšší hodnoty proudu se již remanentní magnetizace oceli kolejnice na výsledném rozložení magnetického pole v okolí výrazněji neprojeví a průběh vypočteného rozložení magnetického pole velmi dobře koresponduje s hodnotami naměřenými.



Obr. 13. Ukázka změřeného průběhu trakčního proudu při měření B_x v ose 2 200 mm od středu kolejice 1,8 m nad kolejnicemi



Obr. 14. Ukázka změřeného průběhu magnetické indukce B_x v ose 2 200 mm od středu kolejice 1,8 m nad kolejnicemi



Obr. 15. Geometrické uspořádání trati

Vyšetřování magnetických polí v okolí tramvajové trati

V této kapitole jsou uvedeny ukázky výsledků modelování a měření magnetických polí v provozních podmínkách tramvajových drah. Měření proběhla ve spolupráci s Dopravním podnikem Ostrava, a. s.

Modelování

Model byl vytvořen za těchto předpokladů:

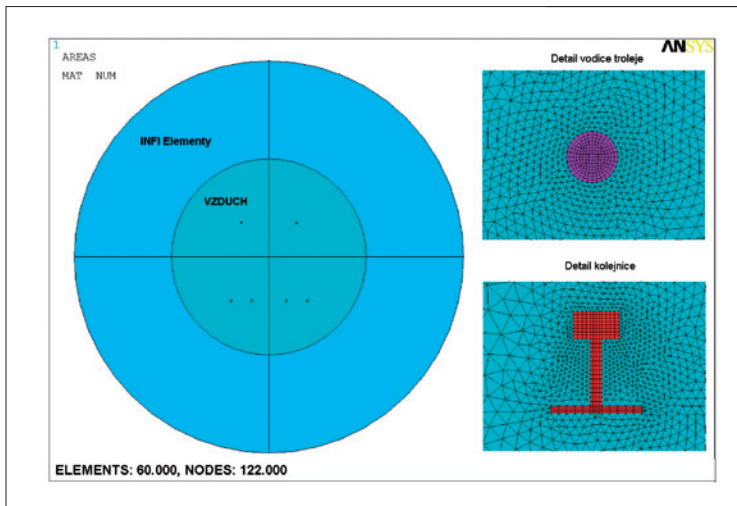
- kolejnice byly modelovány v přesném tvaru,
- trolejový vodič byl nahrazen homogenním vodičem kruhového průřezu,

- pro příklady uvedené v článku bylo zvoleno rozdělení proudů mezi kolejnicí a zemí vyjádřené v procentech: 100:0, 70:30 a 60:40,
- ve zkoumané oblasti se kromě trolejového vedení a kolejnic nepředpokládají žádné další vodivé předměty.

Parametry obvodu jsou uvedeny v tab. 1 a tab. 2, model pro výpočet metodou konečných prvků s podporou programu Ansys s in-fí-prvky je na obr. 8.

Měření

Měření se uskutečnilo v Ostravě-Martínově na trati v areálu dílen DPO – viz obr. 9. Opakovanými pojezdy tramvají bylo dosaženo vysokého přiblížení k běžným provozním



Obr. 16. Model v programu Ansys

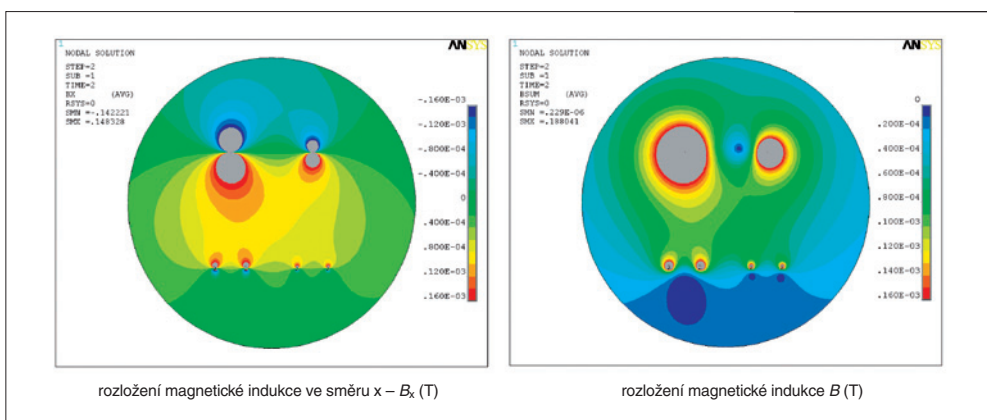
to organizace měření byla použita s mírnými korekcemi měření proudu ve všech experimentech uvedených v článku.

Na obr. 12 jsou znázorněny měřicí body, ze kterých jsou v článku uvedeny výsledky.

Naměřené a vypočtené hodnoty

Na obr. 13 a obr. 14 jsou ukázky naměřeného průběhu proudu a odpovídajícího naměřeného průběhu indukce. Hodnota magnetické indukce je ovlivněna velikostí proudů unikajících z koleje do země, proto byly výpočty provedeny pro nula-, třiceti- a čtyřicetiprocentní únik proudu do země.

Z porovnání naměřených a vypočtených hodnot bylo patrné, že naměřeným hodnotám se velmi přesně blížily hodnoty získané



Obr. 17. Mapy pole magnetické indukce při:

$$I_{\text{trakčního vedení1}} = 1\,000\text{ A}$$

$$I_{\text{trakčního vedení2}} = 500\text{ A}$$

$$I_{\text{koleje1}} = (30 + 30) \% I_{\text{trakčního vedení1}}$$

$$I_{\text{koleje2}} = (30 + 30) \% I_{\text{trakčního vedení2}}$$

Pozn.: Vzhledem k tomu, že v blízkosti vodičů jsou magnetická pole extrémně vysoká, je jejich znázornění na mapě potlačeno (šedá barva). To umožňuje znázornit podrobně pole v místech, která nás zajímají, s dobrým barevným rozlišením.

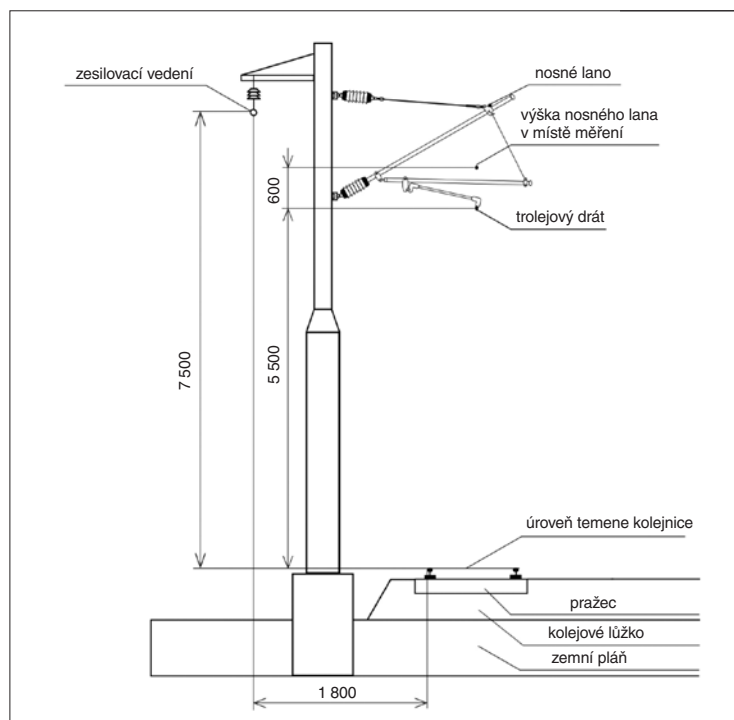
podmínkám. Každé měření mělo část rozjezdovou, kontinuální jízdu i brzdění. Tím, že na trati bylo pouze jedno vozidlo, byla hodnota jím odebíraného proudu rovna proudu v celé troleji. Při každé jízdní fázi je jiné zatížení motoru, a tím i velikost proudu odebíraného z trakčního vedení. Měření magnetické indukce bylo provedeno Gaussmetrem Bell 5180 se sondou MOS51-3204 (obr. 10 dole), jeho přesnost je 1 %, frekvenční rozsah 0 až 40 kHz. Proud byl měřen klešťovým přístrojem PAC11 s hallovou sondou a analogovým výstupem Escort ECT670 výrobce Chauvin Arnoux s rozsahem 0 až 600 A (obr. 10 nahoře).

Uspořádání měřicího stanoviště je na obr. 11.

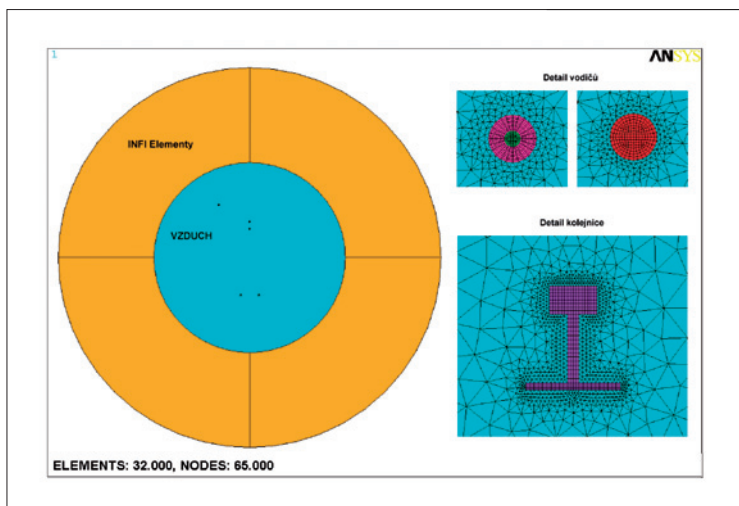
Pozice sondy magnetické indukce v prostoru a orientace sondy byla fixována posuvným vodičkem. Jednotlivé analogové signály byly v průběhu každé jízdy zaznamenávány pomocí PC a měřicí karty DAQ. Vzhledem k vektorové povaze magnetického pole a možnosti měřit pouze jednu osovou složku magnetické indukce při použití uvedeného teslametru, byla sonda orientována do složky B_x , čímž byla zaznamenávána pouze složka indukce vodorovná se zemským povrchem a kolmá k vodičům obvodu (troleji a kolejnicím). Velikost složky magnetické indukce v ose y (složka kolmá k zem-

skému povrchu) je významně menší. V modelových řešeních byla potom vyšetřována jak x-ová složka magnetické indukce, tak i celková hodnota magnetické indukce. Taková-

výpočet, a to jak přímým, s využitím Ampérova zákona celkového proudu, tak i modelováním pomocí metody konečných prvků s podporou programu Ansys s infi-prvky při



Obr. 18. Schéma uspořádání vodičů v místě měření



Obr. 19. Model jednokolejné tratě 3 kV DC pro výpočet v programu Ansys

Schéma uspořádání vodičů na měřené trati je na obr. 18.

Model pro výpočet metodou konečných prvků s podporou programu Ansys je na obr. 19.

Měření

Proud v trolejovém vedení byl měřen na výstupu z trakční napájecí stanice klešťovým přístrojem PAC11 s hallovou sondou. Magnetická indukce byla měřena pomocí přenosného teslametru FWBell-5180.

Naměřené a vypočtené hodnoty

Na obr. 20 a obr. 21 jsou ukázky naměřených hodnot. Podle předpokladů byla hodnota

čtyřicetiprocentním úniku proudu z kolejnic do země. Právě hodnota úniku proudu je slabým místem řešení, protože její velikost je v daném místě prakticky neměřitelná. Z našich mnohaletých zkušeností získaných při měření zemních proudových polí je ovšem tato hodnota u takových tratí, jako byl náš zkušební úsek, velmi reálná.

Příklad modelového řešení dvoukolejné tratě bez vozidla (viz obr. 15 až obr. 17)

Vyšetřování magnetických polí v okolí stejnosměrné tratě 3 kV

Měření bylo realizováno ve spolupráci s VÚŽ Praha, Železničním zkušebním okruhem v Cerhenicích. Při měření byl okruh napájen jednostranně a na okruhu jezdilo pouze jedno vozidlo, takže proud v trolejovém vedení byl měřen přesně. Složitější to bylo s proudem v kolejnicích; tyto tvoří konstrukčně a tedy i obvodově okruh. Proud v kolejnicích do zpětných kabelů tekl z obou stran.

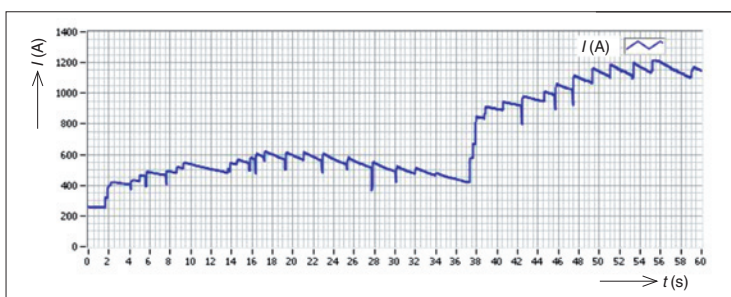
Vlastní měření magnetického pole bylo prováděno poblíž rozvodny na trati velkého okruhu za současného snímání průběhu proudu odebíraného z trakční napájecí stanice.

Modelování

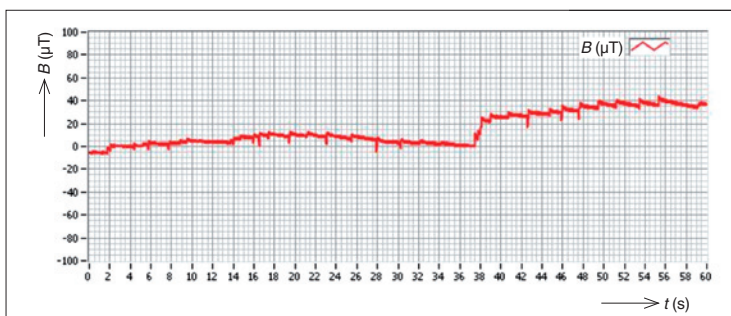
Model byl vytvořen za těchto předpokladů:

- kolejnice byly modelovány v přesném tvaru,
- trolejový drát 150 Cu byl nahrazen homogenním vodičem kruhového průřezu,
- vodič nosného lana 120 Cu,
- vodič zesilovacího vedení 240/39 AlFe,
- vzhledem k zokruhování kolejového vedení bylo pro příklady uvedené v článku zvoleno rozdělení proudů mezi kolejnicí a zemí: 10:90%, 20:80% a 30:70%.

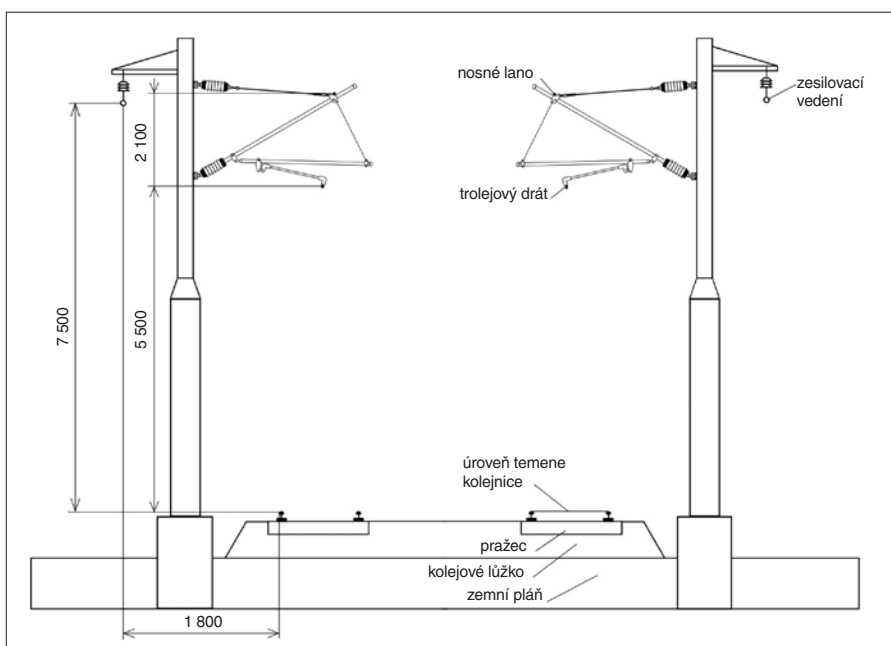
Parametry obvodu jsou uvedeny v tab. 3 a tab. 4.



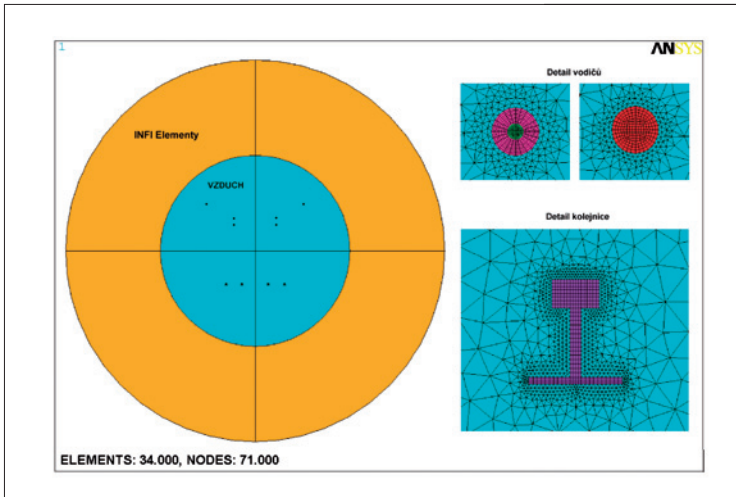
Obr. 20. Ukázka změřeného průběhu trakčního proudu při měření B_x pod trolejí 1,5 m nad kolejnicemi



Obr. 21. Ukázka změřeného průběhu magnetické indukce B_x pod trolejí 1,5 m nad kolejnicemi



Obr. 22. Geometrické uspořádání modelované tratě



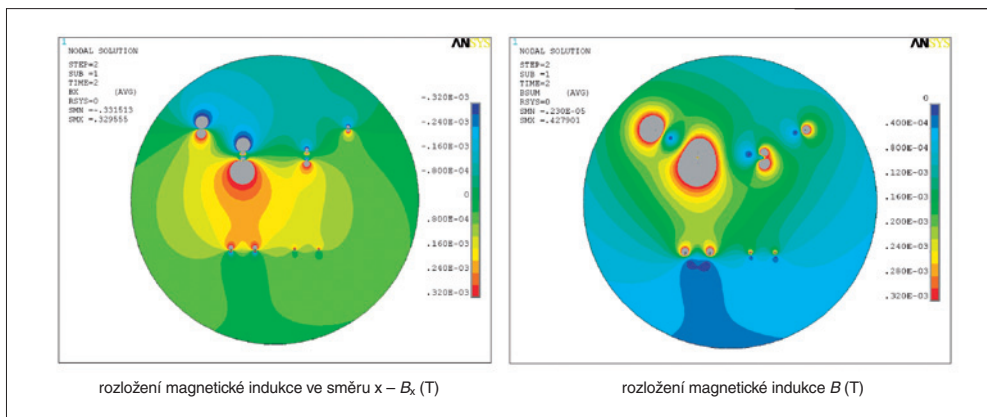
Obr. 23. Model pro výpočet v programu Ansys

tě měření desetiprocentní hodnoty proudu v trakčním vedení. Takto malé hodnoty v místě měření jsou způsobeny zokruhováním kolejnicového vedení.

Příklad modelového řešení dvoukolejné trati bez vozidla (viz obr. 22 až obr. 24)

Vyšetřování magnetických polí v okolí trati 25 kV, 50 Hz

Měření jsme realizovali ve spolupráci se Správou železniční energetiky, středisko České Budějovice. Vlastní měření bylo provedeno v blízkosti Trakční transformovny Nemanice. Střídavou vozbu provozují České dráhy zásadně s jednostranným



Obr. 24. Mapy pole magnetické indukce při:

$I_{\text{trakčního vedení1}} = 3\ 000\ \text{A}$
 (36% trolej + 29% nosné lano + 35% zesilovací vedení)
 $I_{\text{trakčního vedení2}} = 1\ 000\ \text{A}$
 (36 + 29 + 35) %
 $I_{\text{koleje1}} = (20 + 20) \% I_{\text{trakčního vedení1}}$
 $I_{\text{koleje2}} = (20 + 20) \% I_{\text{trakčního vedení2}}$

magnetické indukce silně ovlivněna velikostí proudů unikajících z koleje do země, proto byly výpočty provedeny pro devadesáti-, osmdesáti- a sedmdesátiprocentní únik prou-

du do země. Z porovnání naměřených a vypočtených hodnot bylo zřejmé, že skutečným hodnotám se velmi přesně blíží hodnoty získané výpočtem při kolejovém proudu v mís-

napájením. To znamená, že každý napájecí úsek trakčního vedení je napájen z jednoho napáječe.

Modelování

Model byl vytvořen za těchto předpokladů:

- kolejnice byly modelovány v přesném tvaru,
- trolejový drát 100 Cu byl nahrazen homogenním vodičem kruhového průřezu,
- vodič nosného lana 50 Bz,
- pro příklady uvedené v článku bylo zvoleno rozdělení proudů mezi kolejnicí a zemí: 100:0 %, 75:25% a 50:50 %.

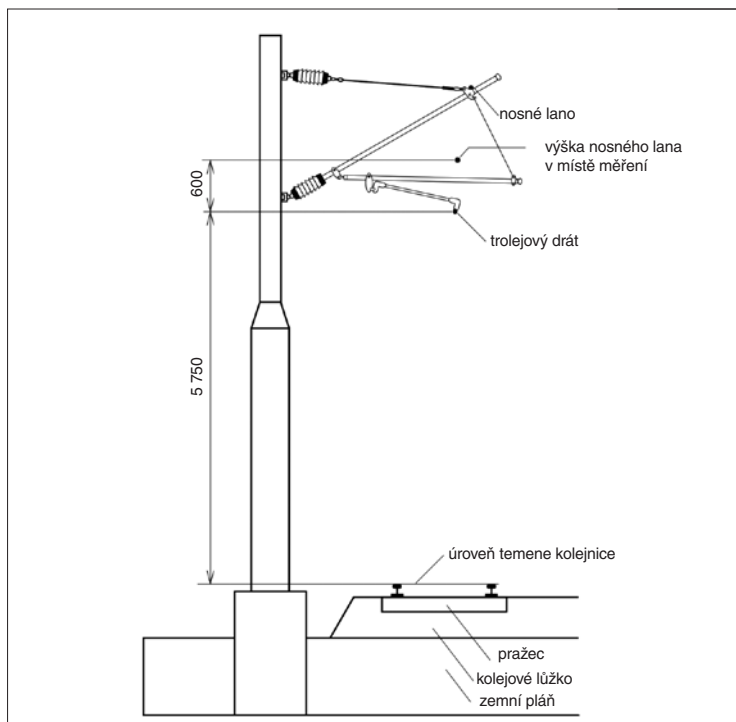
Parametry obvodu jsou uvedeny v tab. 5 a tab. 6.

Schéma uspořádání vodičů na měřené trati je na obr. 25.

Model pro výpočet metodou konečných prvků s podporou programu Ansys je na obr. 26.

Měření

Proud v trolejovém vedení byl snímán z měřicího transformátoru proudu s převodem 600/5 A sondou E3N Chauvin-Arnoux přes měřicí kartu DAQ Card 6062E s podporou programu LabWindows. Magnetická indukce byla měřena pomocí přenosného teslametru FWBELL-5180.



Obr. 25. Schéma uspořádání vodičů na měřené trati

Tab. 3. Trolejové vedení

Vodič	Průřez (mm ²)	Výška nad temenem kolejnice (m)	Rozložení proudů podle odporů (%)
trolej 150 Cu	150	5,5	36
nosné lano 120 Cu	120	6,1	29
zesilovací vedení 240/39 AlFe	243,05	7,5	35

Tab. 4. Kolejnice

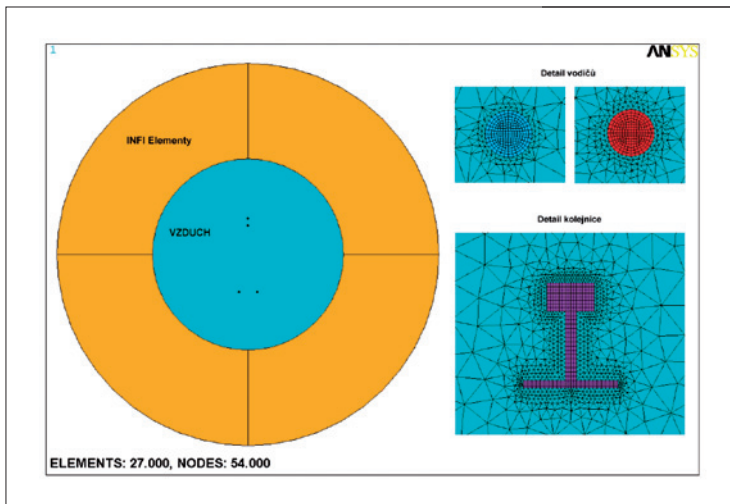
Kolejnice	Průřez (mm ²)	Rozchod koleje (mm)	Permeabilita (μ_r)
UIC60	8279	1435	podle hodnot uvedených v kapitole <i>Magnetické vlastnosti materiálu kolejnic</i>

Tab. 5. Trolejové vedení

Vodič	Průřez (mm ²)	Výška nad temenem kolejnice (m)	Rozložení proudů podle impedancí (%)
trolej 100 Cu	100	5,75	60
nosné lano 50 Bz	50	6,35	40

Tab. 6. Kolejnice

Kolejnice	Průřez (mm ²)	Rozchod koleje (mm)	Permeabilita (μ_r)
UIC60	8279	1435	podle hodnot uvedených v kapitole <i>Magnetické vlastnosti materiálu kolejnic</i>



Obr. 26. Model jedno-kolejné trati 25 kV, 50 Hz v programu Ansys

pole zvyšuje dráždivost nervových struktur vlivem interakce změn magnetického pole s biopotenciály. U trubic většího průměru, ve kterých laminárně proudí kapalina, se působením magnetického pole zpomalí průtok. Popsané změny mohou nastat až vlivem poměrně silných magnetických polí, podle různých odhadů s intenzitou $1,6 \times 10^5$ až $10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

U lidí pracujících v magnetických polích o velké intenzitě byly pozorovány změny reakční doby, snížení kožního odporu, změny sedimentace erytrocytů a jiné nespecifické účinky. Nejvíce projevů je ve sféře vegetativní (vazovegetativní syndrom).

Nehomogenní nízkofrekvenční magnetické pole (pulzující magnetické pole) se používá také k léčení degenerativních onemocnění kloubů, otoků po distorzích kloubů, paréz periferních nervů, bércových vředů a jiných závažných a degenerativních onemocnění. Při léčbě se používají pole s magnetickým gradientem do $5 \text{ mT} \cdot \text{cm}^{-1}$. Mechanismus účinku není zatím plně objasněn a již samo přesné určení intenzity magnetických polí je metodicky velmi obtížné.

Biologické účinky vysokofrekvenčních magnetických polí jsou založeny na mechanismu přeměny v tepelnou energii.

Pro ochranu obyvatelstva před účinky magnetických polí přijala vláda ČR nařízení, z něhož je převzata tab. 7.

Závěr

Z výsledků dosažených při řešení projektu je zřejmé, že pomocí modelových výpočtů s užitím metody konečných prvků, verifikovaných analytickým řešením i experimentem, lze velice dobře popisovat skutečná magnetická pole rozkládající se ve volném prostoru v okolí elektrizovaných tratí, jsou-li

Naměřené hodnoty

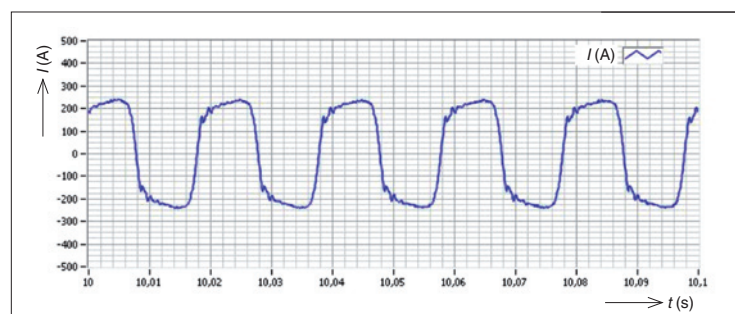
Na obr. 27 a obr. 28 jsou ukázky naměřeného průběhu proudu a odpovídající indukce.

Z porovnání naměřených a vypočtených hodnot byla jejich shoda velmi dobrá při padesátiprocentním úniku proudu z koleje do země.

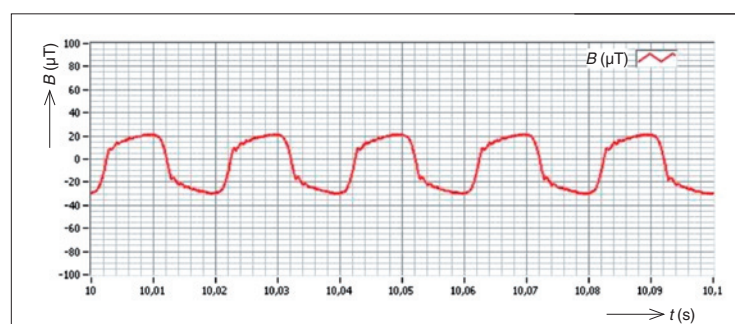
Příklad modelového řešení dvoukolejné trati bez vozidla (viz obr. 29 až obr. 31)

Účinky magnetických polí na živý organismus

Vlivu elektromagnetických polí na lidský organismus je ze strany odborné i laické veřejnosti věnována stále větší pozornost. Podle [8] mají magnetická pole velmi různorodé účinky na nervovou tkáň živých organismů. Experimentální údaje nasvědčují tomu, že stále magnetické pole snižuje a nízkofrekvenční proměnné magnetické



Obr. 27. Ukázka průběhu proudu v trolejovém vedení při měření B_x pod trolejí 1 m nad kolejnicemi



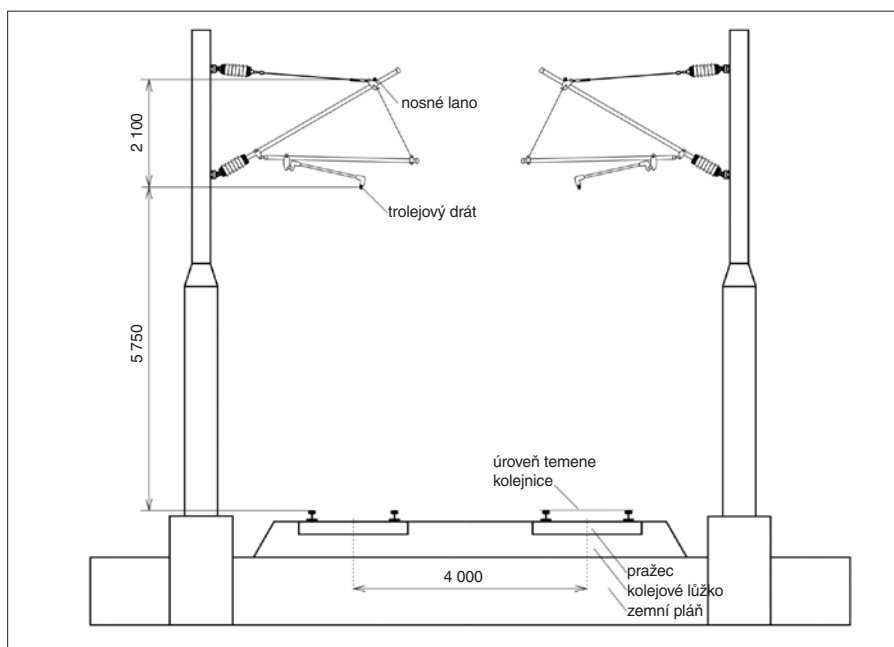
Obr. 28. Ukázka průběhu magnetické indukce B_x pod trolejí 1 m nad kolejnicemi při proudu z obr. 29

Tab. 7. Výňatek z nařízení vlády č. 480/2000 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením

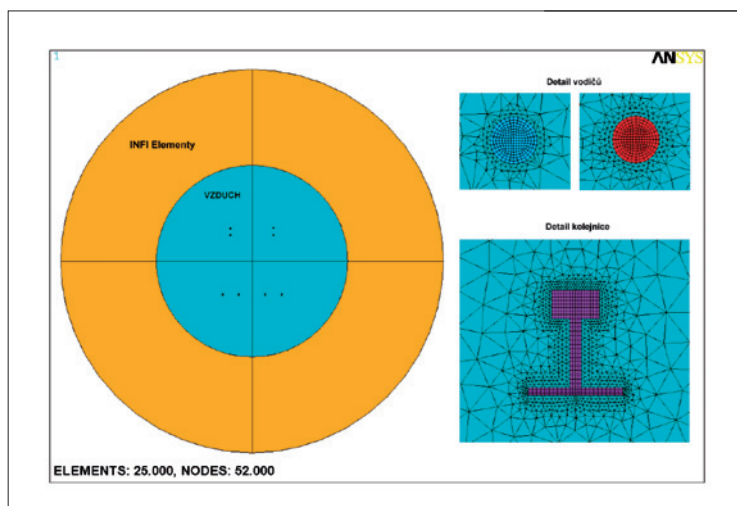
Referenční úrovně pro magnetickou indukci B – nepřetržitá expozice			
zaměstnanci		ostatní osoby	
frekvence f (Hz)	B (T)	frekvence f (Hz)	B (T)
<1	0,28 ^{*)} **)	<1	0,056 ^{*)}
1 až 8	$0,2/f^2$	1 až 8	$0,04/f^2$
8 až 25	$0,025/f$	8 až 25	$0,005/f$
25 až 820	$25 \cdot 10^{-3}/f$	25 až 800	$0,005/f$
50	$500 \cdot 10^{-6}$	50	$100 \cdot 10^{-6}$
820 až $3 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	800 až $3 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$3 \cdot 10^3$ až $65 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^3$ až $150 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$65 \cdot 10^3$ až 10^6	$2/f$	$150 \cdot 10^3$ až 10^6	$0,92/f$
10^6 až 10^7	$2/f$	10^6 až 10^7	$0,92/f$
10^7 až $4 \cdot 10^8$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	10^7 až $4 \cdot 10^8$	$0,092 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8$ až $2 \cdot 10^9$	$10^{-11} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ až $2 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^{-12} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ až $3 \cdot 10^{11}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^9$ až $3 \cdot 10^{11}$	$0,20 \cdot 10^{-6}$

^{*)} špičková hodnota,

^{**)} časový průměr magnetické indukce ve směně při expozici zahrnující trup nebo hlavu; nejvyšší hodnota magnetické indukce přitom nesmí být v žádném okamžiku vyšší než 2 T.



Obr. 29. Geometrické uspořádání modelované trati



Obr. 30. Model pro výpočet v programu Ansys

podrženy určité základní podmínky. První podmínkou je dostatečně přesné rozměrové a tvarové provedení modelu a druhou podmínkou pak znalost magnetických vlastností feromagnetických objektů nacházejících se v řešené oblasti (tedy obecně všech ocelových částí a dílů).

Provedená měření magnetického pole na volné trati či měření magnetického pole v okolí kolejnice ukázala oprávněnost použití modelu 2D. Pro detailní modelování by bylo možné použít ve složitějších konstrukčních geometriích model 3D. Tento model ovšem, vzhledem k rozměrnosti celé soustavy a rozdílnosti geometrických rozměrů jednotlivých částí (poměr maximálních a minimálních rozměrů je v řádu 10^3), vyžaduje mimořádnou počítačovou podporu.

Při vyhodnocování výsledků modelových výpočtů v těchto oblastech je rovněž důležité mít na zřeteli, že vypočtené hodnoty magnetického pole v prostoru (především ve vzdálenějších místech od proudovodičů) se budou lišit o složku tvořenou magnetickým polem Země, která se pohybuje v našich zemepisných šířkách přibližně v rozsahu 10 až 30 μ T. V oblastech velmi blízkých povrchu ocelových vodičů (kolejnic) budou vypočtené hodnoty zkresleny o magnetické pole vytvářené remanentní magnetizací materiálů těchto vodičů.

Měřeními i modelováním se potvrdilo, že v okolí elektrizovaných tratí, kde se volně pohybují lidé, jsou trvalá magnetická pole menší, než jsou dovolené hodnoty trvalé expozice.

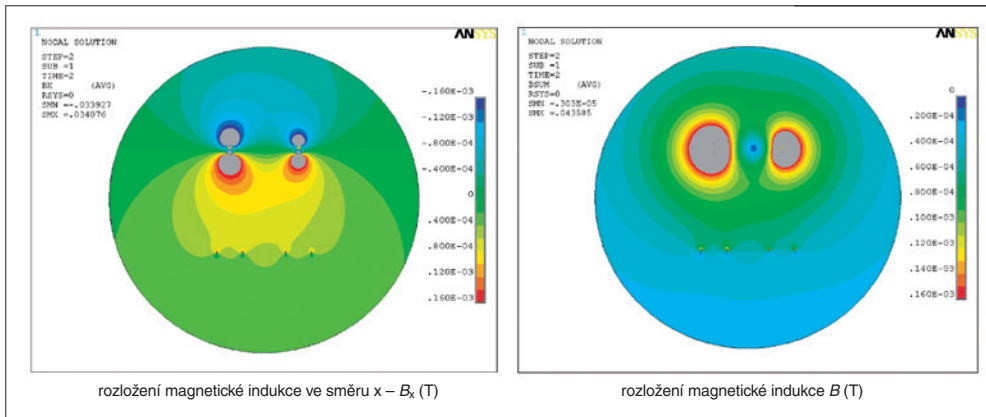
Literatura

- [1] PALEČEK J. a kol.: *Vliv elektrické vozby na životní prostředí, závěrečná zpráva projektu GAČR 103/05/0660*. VŠB-TU Ostrava 2008.
- [2] ANSYS *Magnetic Volume I* Houston, PA, 1994.
- [3] *Finite Element Analysis System. User's Guide*, Terra Analysis Company, Tarzana, CA, 1995.
- [4] SILVESTER P. – FERRARI L.: *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge, 1996.
- [5] HOFMANN G.: *Berechnung elektrischer und magnetischer Felder zur Lösung von Fragen bei der Projektierung*. Berichte und Informationen 1/96, HTW Dresden, 1996.

Vysvětlení pojmů:

BH charakteristika – závislost magnetické indukce B feromagnetického materiálu na intenzitě magnetického pole H . Může být buď jen magnetovací, nebo úplná hysterezní, stejnosměrná nebo střídavá pro určitou frekvenci.

INFI prvky – v analýzách elektromagnetických polí se mohou použít tzv. *infinite boundary elements* (INFI prvky). Jsou to typy prvků, které při výpočtu magnetického pole matematicky zohledňují nekonečně velký prostor kolem řešeného objektu.



Obr. 31. Mapy pole magnetické indukce při:

$I_{\text{trakčního vedení1}} = 1\,000\text{ A}$ (60 % trolej + 40 % nosné lano)

$I_{\text{trakčního vedení2}} = 700\text{ A}$ (60 + 40) %

$I_{\text{koleje1}} = (15 + 15) \% I_{\text{trakčního vedení1}}$

$I_{\text{koleje2}} = (15 + 15) \% I_{\text{trakčního vedení2}}$

- [6] POLÁK J.: *Variační principy a metody teorie elektromagnetického pole*. Praha, 1988.
- [7] VARGA L. – ILENIN S. – CHLADNÝ V.: *Dynamic events at flaking of ice coating from overhead transmission line conductors*. Energetika un elektrotehnika, Scientific Proceedings of Riga Technical University, RTU Riga, 2006, ISSN 1407-7345.
- [8] HRAZDÍRA I.: *Biofyzika*. Učebnice pro lékařské fakulty. Praha, 1990.
- [9] Nařízení vlády č. 480/2000 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.
- [10] ČSD – S3 *Nákresný přehled stavu železničného zvršku trate*. 1980.
- [11] *Širokopátní kolejnice*. PN TŽ 42 0190, Třinec, 1991.
- [12] <http://fei.vsb.cz/kat453/www453>, VŠB-TU Ostrava, FEI, Laboratoř magnetických měření.
- [13] www.trz.cz, Třinecké železářny.

Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Railways

Magnetic fields constitute an inseparable part of the environment. It is therefore desirable to know their values, especially in the vicinity of power lines and equipments, which are the source of the strongest fields to which people are normally exposed. In the submitted project we would like familiarize the readers with some of the outcomes of the Influence of Electric Railways on Environment (project Czech Science Foundation No 103/05/0660). The article presents the results of the investigation of magnetic fields in the vicinity of tram lines with traction system 600 V DC, rail lines with traction system 3 kV DC and rail lines with traction system 25 kV AC. The results were obtained by way of modelling with the use of method of final elements with the support of the ANSYS programme, with the direct use of Biot-Savart's law, Ampere's law of total current, and vector magnetic potential with the support of MS Excel. The model results were compared to the values measured in the operation conditions in the Czech railways and the city transport in Ostrava.



prof. Ing. Josef Paleček, CSc., absolvoval v roce 1968 Vysokou školu dopravní v Žilině v oboru Elektrická trakce a energetika v dopravě. V tomto oboru získal roce 1974 titul kandidáta věd a v roce 1984 byl jmenován docentem. V roce 2001 byl jmenován profesorem pro obor elektroenergetika. V roce 1993 přešel z VŠD v Žilině na VŠB-TU Ostrava, kde se specializuje na elektroenergetiku v dopravě. V rámci výzkumu se orientuje hlavně na energetickou a trakční napájecí soustavu a věnuje se studiu vlivů elektrické vozby na kovová úložná zařízení. Spolupracuje s VUŽ Praha, ČD, ČEPS a zahraničními školami, které jsou zaměřeny na problematiku elektrizovaných drah, především v Rusku, Německu a Polsku.



Ing. Petr Kačor, Ph.D., absolvoval v roce 1998 VŠB-TU Ostrava na Fakultě elektrotechniky a informatiky v oboru Elektrické stroje a přístroje. V roce 2003 získal doktorský titul obhajobou disertační práce se zaměřením na využití numerického modelování a analýz v elektrických přístrojích. V období let 2004 až 2005 pracoval jako technický manažer v Taesung S&E Inc., Seoul, Jižní Korea, kde se zabýval výpočty elektrických zařízení metodou konečných prvků. Od roku 2006 pracuje na VŠB-TU Ostrava na Katedře elektroenergetiky. Vede Laboratoř modelování fyzikálních polí a zabývá se využitím metody konečných prvků pro konstrukční návrhy, optimalizace a vývoj elektrických strojů a přístrojů. V tomto oboru spolupracuje s průmyslovou praxí.



Ing. Martin Marek, Ph.D., absolvoval v roce 1999 VŠB-TU Ostrava, Fakultu elektrotechniky a informatiky na Katedře elektrických strojů a přístrojů. Disertační práci na téma Magnetické vlastnosti konstrukčních materiálů, jejich měření a užití obhájil v roce 2005. V současné době působí na VŠB-TU Ostrava na Katedře elektroenergetiky jako odborný asistent a vede Laboratoř magnetických měření a aplikací. Specializuje se na měření a aplikace magnetických vlastností materiálů a obecně problematiku elektromagnetických zařízení. Spolupracuje s průmyslovou sférou v oboru.



Ing. Petr Orság, Ph.D., absolvoval Vysokou školu báňskou v Ostravě v roce 1988, obor Elektrické stroje a pohony. Titul Ph.D. získal v roce 2000. Na VŠB působí od roku 1988, v současnosti na Katedře elektrotechniky. Dlouhodobě se věnuje problematice modelování obvodů s neharmonickými průběhy elektrických veličin a měření vedených elektromagnetických interferencí. Průběžně spolupracuje s průmyslovou praxí.



RNDr. Ctibor Henzl, Ph.D., absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu UK v Praze, obor Matematika – fyzika v roce 1963. Titul RNDr. získal na UP v Olomouci v roce 1988, titul Ph.D. na VŠB-TU Ostrava v roce 2001. Od 1963 do 1967 vyučoval na střední škole. V letech 1967 až 1990 pracoval jako samostatný programátor – analytik v OKD Ostrava. Od roku 1990 do odchodu do důchodu v roce 2005 působil jako odborný asistent na Katedře teoretické elektrotechniky VŠB-TU Ostrava. Věnoval se programování, teorii elektromagnetického pole a aplikaci numerických metod. V současné době působí na VŠB-TU Ostrava jako emeritní akademický pracovník na Katedře aplikované matematiky, kde vyučuje lineární algebru.



Ing. Jiří Foldyna, Ph.D., absolvoval obor Elektrické stroje a přístroje na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava v roce 2004. Magisterský program ukončil diplomovou prací na téma Ověřování magnetických vlastností materiálů používaných pro stavbu elektrických strojů a přístrojů. V roce 2008 ukončil doktorský studijní program disertační prací Diagnostika elektrického kontaktu. V průběhu působení na katedře se věnoval především diagnostice elektrických zařízení a problematice ložiskových proudů v elektrických strojích. V současné době se zaměřuje na využití moderních měřicích systémů v diagnostice elektrických zařízení a vývojem automatizovaných systémů.