

PROXIMITY EFEKT NA VEDENIACH NÍZKOOHMÝCH PECÍ

PROXIMITY EFFECT IN LOW OHMIC FURNACES POWER LINES

Pavel Novák

Katedra elektroenergetiky, FEI TU Košice, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Abstrakt Predmetom článku je ukážka použitia numerickej metódy elementárnych vodičov pre riešenie proximity efektu na zväzkových vodičoch, tvoriacich prívody k nízkoohmovým elektrickým peciam. Prezentované výsledky sú uvádzané v kriteriálnej forme, s využitím fyzikálnej podobnosti elektromagnetických polí. Výsledky sú použiteľné pri optimalizácii impedančných pomerov na predmetných zväzkových prívodoch prevádzkovaných s prúdmi vyššími ako 1kA.

Summary The aim of this article is to demonstrate the using of elementary conductors numerical method for proximity effect solution on the bundle – conductors that create the supplies to so called low-ohmic electric furnaces. Presented results are given in criterial form using the physical similarity of electromagnetic fields. The results are useable at optimalization of impedance ratio on the given bundle power lines that are working with currents over 1kA.

1. ÚVOD

Vychádzajúc z fyzikálnych metód konverzie elektrickej energie na technologické teplo, jednotným znakom tzv. nízkoohmových elektrických pecí je prevádzka pri nízkych napätiach a vysokých intenzitách záťažných prúdov. Klasickými technológiami sú napr.: výroba elektroocelí v oblúkových peciach, výroba skla v odporových taviacich peciach, výroba ferozliatin v odporovo - oblúkových peciach a ďalšie [1]. Elektrickým kritériom nízkoohmových pecí je ich malá impedancia, porovnateľná s impedanciou prívodov elektrickej energie do konverzného agregátu.

Vysoké prevádzkové prúdy v radových hodnotách 10^3 A a viac, indukujú v okolí prívodov silné elektromagnetické polia (EMP), ktoré spätne ovplyvňujú ich prenosovú schopnosť zvýraznením povrchových javov na jednotlivých vodičoch. Okrem iných účinkov je to najmä značné zvýšenie odporu vodičov dôsledkom skin efektu a proximity efektu, čo sekundárne znižuje užitočný výkon pecí a ich elektrickú účinnosť [2].

Problémom racionalizácie prevádzky nízkoohmových pecí je, že predmetné prívody sa v praxi navrhujú a overujú bez dôkladnej analýzy účinkov EMP, čo pri porovnateľných impedanciách pecí a prívodov môže výrazne skresliť elektrické charakteristiky pecí, a tým aj reálny pohľad na energetickú náročnosť taviacich technológií. Teda, podmienkou znižovania spotreby elektrickej energie pri menovaných procesoch, mimo iného, je aj objektívne zhodnotenie vplyvu polí na prenosovú schopnosť prívodov.

Uvedený problém sa riešil na pracovisku autora v rámci grantového projektu VEGA SR, č.1/5022/98 a pokračuje v projekte VEGA SR, č. 1/8133/01.

2. STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA POVRCHOVÝCH JAVOV A POPIS METÓDY ICH ANALÝZY

Povrchovým javom všeobecne označujeme nerovnomerné rozloženie prúdovej hustoty na priereze sledovaného vodivého objektu, ako dôsledok ním pretekajúceho striedavého prúdu. Ak vodivým objektom je osamotený vodič (spätný vodič je dostatočne vzdialený resp. priestorovo nie je definovaný, napr. zem), nerovnomerné rozloženie prúdovej hustoty je spôsobené len vlastným poľom vodiča. Tento povrchový jav je skin efekt. Ak predmetný vodič sa nachádza v blízkosti iných, je pod účinkom vlastného poľa a polí susedných vodičov. Povrchový jav ako dôsledok vplyvu susedných polí je efekt blízkosti resp. proximity efekt. V oboch prípadoch výsledkom nerovnomerného rozloženia prúdovej hustoty na priereze skúmaného vodiča je iná hodnota jeho odporu R_{ac} , v porovnaní s odporom rovnakého vodiča pretekaného jednosmerným prúdom R_{dc} . Touto zmenou odporov je definovaný koeficient povrchových javov

$$k_p = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = k_s \cdot k_b \quad (1)$$

kde k_s je koeficient skin efektu vodiča a k_b je celkový koeficient proximity efektu pre ten istý vodič. Formálny zápis (1) možno vyjadriť adresnejšie pre konkrétny zväzok vodičov. Koeficient povrchového javu i -tého v n -vodičovom zväzku bude

$$k_{pi} = k_{si} \cdot \prod_{j=1, j \neq i}^n k_{bi,j} \quad (2)$$

v ktorom $k_{bi,j}$ je koeficient proximity efektu medzi i -tým a j -tým vodičom zväzku.

Nerovnomernosť rozloženia prúdovej hustoty na priereze vodiča, ktorá zároveň spôsobuje aj nerovnomerné generovanie elektrických strát, závisí od fyzikálnych vlastností vodiča (konduktivity γ a

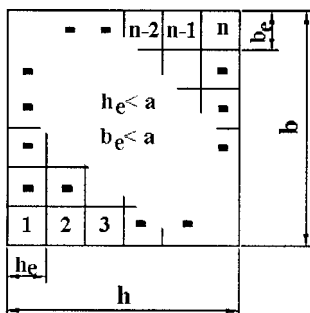
permeability μ) a od frekvencie pretekajúceho prúdu ($\omega = 2\pi f$). Mierou tejto nerovnomernosti je ekvivalentná hĺbka vniku elektromagnetickej vlny do vodiča, ktorá je definovaná známym vzťahom

$$a = \sqrt{\frac{2}{\gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Na výpočet koeficientov povrchových javov, resp. s ich využitím výpočet impedancií vodičov, existuje niekoľko metód. Líšia sa presnosťou, pracnosťou, časovou náročnosťou, ako aj použiteľnosťou pre konkrétny tvar vodičov, počet vodičov a ich priestorovú geometriu vo zväzku. Prívody k nízkoohmovým peciam majú spravidla zložitú konfiguráciu s väčším počtom vodičov vo zväzku, sú trojfázové. Napokon sú prevádzkované v prostredí silných EMP a v náročných teplotných podmienkach, z čoho sumárne vyplýva, že objektívne zhodnotenie povrchových javov pri použití ktorejkoľvek metódy výpočtu nie je jednoduché.

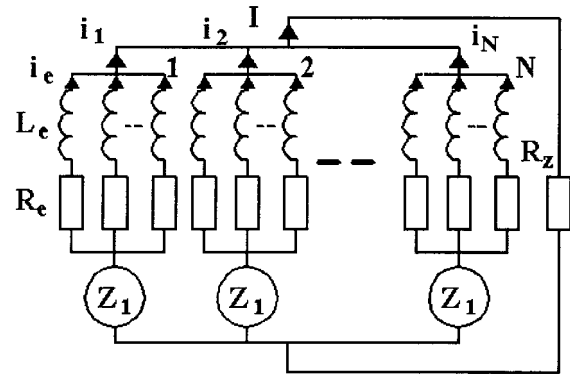
V bežnej inžinierskej praxi sa výpočet robil približným spôsobom, využívajúcim buď empiricky alebo experimentálne známe (v tabelárnej alebo grafickej forme) jednotlivé hodnoty koeficientov k_s a k_b . Tieto hodnoty spravidla platia len pre obmedzený tvar a počet vodičov vo zväzku. Preto najmä odčítaná hodnota k_b je problematická a teda aj pri presnom vyčíslení R_{dc} (zohľadnením oteplenia vodiča), výpočet R_{ac} môže byť len orientačný [2,3].

Podstatne presnejšie výsledky v súčasnosti poskytujú metódy matematického modelovania, buď analytické alebo numerické. Z niekoľkých alternatív pri riešení predmetnej úlohy sme použili numerickú metódu elementárnych vodičov [4,5]. Princíp metódy spočíva v delení skúmaného vodiča na jeho priereze na tzv. elementárne vodiče s takým počtom (t.j. s takými rozmermi), aby pri ľubovoľnom rozložení prúdovej hustoty na priereze modelovaného vodiča, bolo jej rozloženie v jednotlivých elementárnych vodičoch vždy rovnomerné. Tento, pre správnosť výpočtu dôležitý predpoklad bude splnený vtedy, ak rozmery elementárnych vodičov budú menšie ako hĺbka vniku elektromagnetickej vlny podľa (3). Teda delenie modelovaného vodiča musí byť dostatočne husté (obr.1). Delením všetkých vodičov vo zväzku sa získa náhradná schéma sériovo-paralelného RL obvodu, znázorneného na obr.2.



Obr. 1. Delenie vodiča na elementárne obdĺžnikového prierezu

Fig. 1. Dividing of conductor to elementary ones with rectangular cross-section



Obr. 2. Náhradná schéma RL – obvodu
Fig. 2. Alternative scheme of RL - circuit

V náhradnom obvode sa dajú vypočítať odpory, vlastné a vzájomné indukčnosti každého elementárneho vodiča, teda aj každej vetvy, reprezentujúcej i -tý vodič zväzku. Stručne, algoritmus riešenia je nasledovný: Pri zadefinovaných hodnotách prúdových alebo napätových zdrojov Z_i , veľkosti odporu tzv. referenčného vodiča R_z (zem, s merným odporom 5-100 Ωm^{-1}) a vypočítaných stredných geometrických vzdialenostiach medzi jednotlivými elementárnymi vodičmi, sa určia odpory a predmetné indukčnosti elementárnych vodičov. Následne, podľa náhradnej schémy (obr.2) sa vypočítajú fázory elementárnych prúdov, umožňujúce stanoviť impedancie jednotlivých vodičov, napr. i -tého:

$$Z_i = \frac{U_i - R_z \cdot I}{I_i} \quad (4)$$

kde U_i je fázor napätia na i -tom vodiči,

I_i je fázor prúdu pretekajúceho i -tým vodičom

$$I_i = \sum I_{ei} \quad (5)$$

I je fázor prúdu pretekajúceho referenčným vodičom

$$I = \sum I_i \quad (6)$$

Zo známych impedancií sa postupne vypočítajú hodnoty odporov, reaktancií a koeficientov povrchových javov modelovaných vodičov [5].

3. APLIKÁCIA METÓDY ELEMENTÁRNYCH VODIČOV NA RIEŠENIE POVRCHOVÝCH JAVOV S VYUŽITÍM FYZIKÁLNEJ PODOBNOSTI

Riešenie povrchových javov metódou elementárnych vodičov (podobne ako pri iných metódach) sa všeobecne zjednodušuje s poklesom počtu premenných a parametrov rozhodujúcich pre daný jav. Vhodným prostriedkom k takému zjednodušeniu je využitie princípov fyzikálneho modelovania. Uplatnením fyzikálnej podobnosti na povrchové javy sa dá prostredníctvom vhodne určených tzv. kritérií

a indikátorov podobnosti dosiahnuť zníženie počtu premenných, potrebných pre výpočet predmetnou metódou. Nové premenné sa vyjadrujú v pomerných hodnotách (kritériá podobnosti sú bezrozmerné komplexy pôvodných veličín) a ak sa zároveň aj výsledky riešenia uvedú v takých hodnotách, stávajú sa univerzálne pre všetky fyzikálne podobné povrchové javy [6].

Určujúcou premennou veličinou pre fyzikálne modelovanie povrchových javov je prúdová hustota v skúmanom vodiči, ktorej rozloženie popisuje Helmholtzova rovnica

$$\nabla^2 \mathbf{J} - j\omega\gamma\mu\mathbf{J} = 0 \quad (7)$$

Ak prijmeme predpoklad, že modelový vodič (model) je z rovnakého materiálu ako modelovaný (originál), t.j. materiálové mierky podobnosti sú jednotkové ($m_v = m_u = 1$), potom prostredníctvom rovnice (7) a s využitím (3) sa dá jednoducho získať základné kritérium podobnosti pre fyzikálne modelovanie povrchových javov

$$\pi = L_O^2 \cdot f_O = L_M^2 \cdot f_M \quad (8)$$

v ktorom L je charakteristický rozmer vodiča (napr. prierez, polomer...), f je frekvencia pretekajúceho prúdu. Index „O“ sa vzťahuje na originál, index „M“ na model vodiča. Po zavedení mierok podobnosti $m_L = L_M/L_O$ a $m_f = f_M/f_O$, z kritéria (8) vyplýva zodpovedajúci indikátor podobnosti

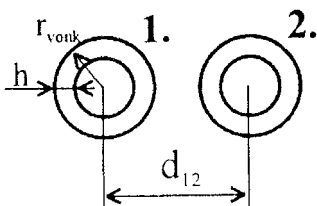
$$m_L^2 \cdot m_f = 1 \quad \text{resp.} \quad m_L^2 = \frac{1}{m_f} \quad (9)$$

Pri splnení podmienky (9) je tvar poľa na priereze originálu a modelu zhodný, rozloženie prúdovej hustoty rovnaké, teda rovnaký musí byť aj koeficient povrchového javu ($m_{kp} = 1$).

Na výpočet konkrétneho povrchového javu pre konkrétny zväzok vodičov kritérium (8) sa dá vyjadriť adresnejšie, podľa tvaru prierezu vodičov a ich vzájomných vzdialeností vo zväzku.

4. PROXIMITY EFEKT VO ZVÄZKU VODIČOV ROVNAKÉHO PRIEREZU

Z dôvodu stručnejšieho popisu a jednoduchšieho vyjadrenia výsledkov uvažujeme jednoduchý dvojvodičový zväzok, napr. v tvare kruhového prierezu, podľa obr. 3.



Obr. 3. Zväzok dvoch vodičov kruhového prierezu
Fig. 3. Bundle of two conductors with circular cross-section

Rozmery vodičov a ich uloženie v priestore je jednoznačne dané vonkajším polomerom r_{vonk} , hrúbkou steny h (v prípade plného vodiča $r_{vonk} = h$) a osovú

vzdialenosťou vodičov d . Smer prúdov v oboch vodičoch je rovnaký, bez definovania spätného prúdu. Pre túto sústavu kritérium (8) môžeme vyjadriť vo viacerých tvaroch, ako

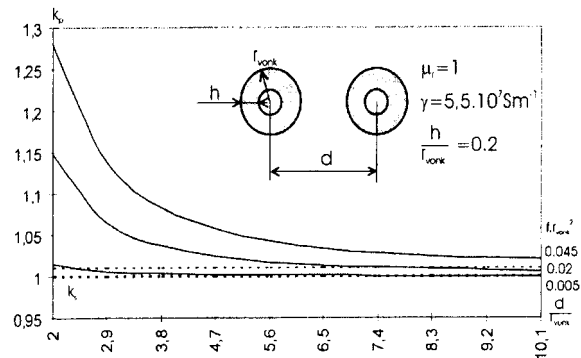
$$\pi_1 = r_{vonk}^2 \cdot f \quad \text{resp.} \quad \pi_2 = h^2 \cdot f \quad \text{resp.} \quad \pi_3 = d^2 \cdot f \quad (10)$$

alebo ich kombináciou ($\sqrt{\pi_2/\pi_1}$ a $\sqrt{\pi_3/\pi_1}$) vo vyhovujúcejšej forme

$$\pi'_1 = \pi_1 = r_{vonk}^2 \cdot f_i \quad \text{resp.} \quad \pi'_2 = \frac{h}{r_{vonk}} \quad \text{resp.} \quad \pi'_3 = \frac{d}{r_{vonk}} \quad (11)$$

Ostatné zápisy umožňujú vyjadriť koeficient povrchového javu ako funkciu jedného z kritérií (11), pričom ostatné budú parametrické veličiny. K fyzikálnemu významu kritérií (11) treba poznamenať, že kritérium π'_1 (komplex veličín) prezentuje intenzitu utlmovania elektromagnetickej vlny vo vodiči, kritériá π'_2 a π'_3 (simplexy veličín) popisujú tvar prierezu vodičov a ich vzájomnú vzdialenosť. Nakoľko nie je definovaný spätný vodič (uzavretá slučka) povrchový jav sa prejaví iba na zmene odporu predmetných vodičov. Uvedieme k tomu niekoľko výsledkov [7, 8].

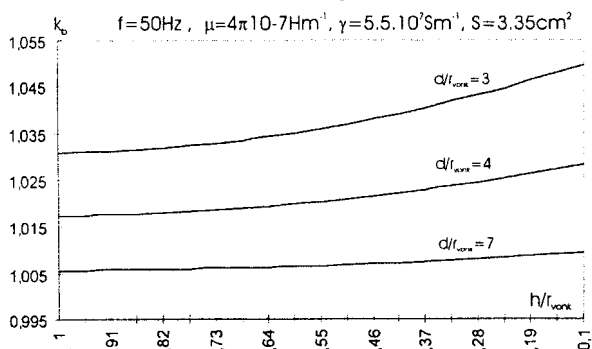
Principiálny pohľad na zmenu proximity efektu, vyjadrené celkovým koeficientom povrchového javu $k_p = k_s \cdot k_b$, vyvolanú zmenou vzájomnej vzdialenosti medzi vodičmi dáva obr. 4. Parametrom tejto funkcie je kritérium π'_1 (hĺbka vniku). Zo zobrazených kriviek jednoznačne vyplýva, že s nárastom pomernej vzdialenosti medzi vodičmi (π'_3) proximity efekt výrazne klesá. Zároveň klesá so znižujúcim sa parametrom π'_1 , teda pri väčšej hĺbke vniku elektromagnetickej vlny do vodičov, čomu zodpovedá rovnomernejšie rozloženie prúdovej hustoty na ich priereze.



Obr. 4. Závislosť k_p od hĺbky vniku EMP
Fig. 4. Dependency of k_p on depth of penetration

Zaujímavý výsledok poskytuje obr. 5, znázorňujúci funkciu len koeficientu $k_b = f(\pi'_2)$, s parametrom pomernej vzdialenosti medzi vodičmi (π'_3). Na vodičoch rovnakého prierezu ($S = 335 \text{ mm}^2$, čomu zodpovedá $J = 3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ pre pretekajúci prúd $I = 1 \text{ kA}$ v jednom vodiči) s poklesom pomernej hrúbky steny vodičov (π'_2) rastie logicky koeficient k_b tým rýchlejšie, čím je menšia ich pomerná vzdialenosť. So vrastajúcou pomernou hrúbkou steny zároveň klesá, až je zanedbateľný pri dostatočne veľkej vzdialenosti medzi

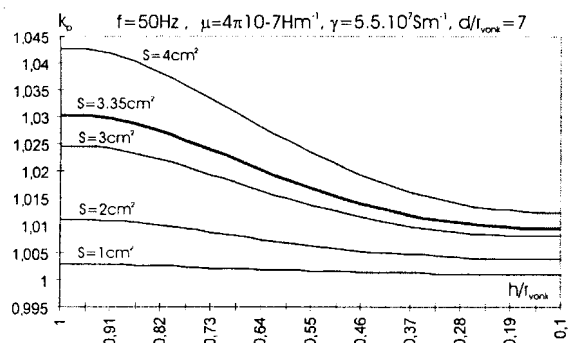
vodičmi, nakoľko vplyv poľa susedného vodiča sa oslabuje (pozri krivku $d/r_{vonk} = 7$) a súčasne rozloženie prúdovej hustoty je rovnomernejšie.



Obr. 5. Závislosť koeficientu blízkosti od tvaru vodičov

Fig. 5. Dependency of closeness coefficient on conductor shape

Pre predmetnú pomernú vzdialenosť $d/r_{vonk} = 7$ na obr. 6 je znázornená funkcia koeficientu $k_p = f(\pi_2)$, pre rôzne účinné prierezy vodičov ako parametrom funkcie.



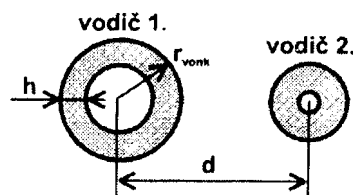
Obr. 6. Závislosť k_p od kritéria h/r_{vonk} pre rôzne prierezy

Fig. 6. Dependency of k_p on criteria h/r_{vonk} for different cross-sections

Jednotlivé krivky zohľadňujú aj vplyv skin efektu, a pretože tento pri konštantnom π_1 s pomernou hrúbkou vodičov (π_2) rastie, koeficient k_p má iný priebeh ako koeficient k_b na obr. 5. Pri konštantnej pomernej vzdialenosti vodičov koeficient k_p so zmenšujúcou pomernou hrúbkou klesá intenzívnejšie na veľkom priereze vodičov (pozri $S = 4 \text{ cm}^2$), ale minimálne sa mení na malých prierezoch (pozri $S = 1 \text{ cm}^2$), pretože koeficient skin efektu na menšej pomernej hrúbke je výrazne menší. Preto pre ľubovoľný prierez vodičov celkový koeficient k_p vždy klesá. Dá sa povedať, že na hodnotu k_p má väčší vplyv koeficient k_s , ako k_b . V praxi to znamená, že je výhodnejšie projektovať zväzok vodičov s tenkou hrúbkou steny a s väčšími vzdialenosťami medzi nimi, prirodzene pri dodržaní potrebných elektrických a pevnostných podmienok.

5. PROXIMITY EFEKT VO ZVÄZKU VODIČOV ROVNAKEJ VEĽKOSTI ALE RÔZNEHO TVARU PRIEREZU

Z teoretického i praktického pohľadu projektovania sekundárnych obvodov nízkohmových spotrebičov, môže byť tiež zaujímavé sledovať problém uvedený v názve kapitoly. Stretáme sa s ním v rôznych modifikáciách predmetných obvodov, ktoré sa robia najmä za účelom ich impedančnej symetrizácie. Znovu, z dôvodu stručnosti, uvažujme len dvojvodičový zväzok v rôznom tvare kruhového prierezu, ale rovnakej veľkosti podľa obr. 7.



Obr. 7. Zväzok dvoch vodičov rôzneho prierezu
Fig. 7. Bundle of two conductors with different cross-section

Úlohou bude zistiť vplyv zmeny geometrických parametrov jedného z vodičov pri konštantných druhého, na koeficient povrchového javu, teda aj na ich odpor.

V porovnaní s riešením aplikovaným v predchádzajúcej kapitole musíme zvoliť iný postup, nakoľko úloha sa stáva asymetrickou. Bol zvolený postup na základe porovnávania činných strát spôsobených striedavým prúdom k činným stratám jednosmerným prúdom, rovnako veľkým ako je efektívna hodnota striedavého prúdu [7]. Koeficient povrchových javov potom tiež je

$$k_p = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \cdot \frac{I_{ac,ef}^2}{I_{dc}^2} = \frac{\Delta P_{ac}}{\Delta P_{dc}} \quad (12)$$

z ktorého po vyjadrení činných strát oboma prúdmi dostaneme:

$$k_p = \frac{S}{I_{ac,ef}^2} \cdot \sum \frac{|I_e|^2}{S_e} \quad (13)$$

kde $I_{ac,ef} = |I|$ je absolútna hodnota fázora prúdu definovaná podľa (6)

I_e je fázor efektívnej hodnoty prúdu elementárnym vodičom o priereze S_e , pri celkovom priereze vodiča S .

Na sérii nasledujúcich grafických zobrazení sú vyjadrené jednotlivo závislosti koeficientov k_p , k_s a k_b ako funkcie meniacej sa pomernej hrúbky jedného z vodičov zväzku. Geometrické parametre sú dané na obrázkoch.

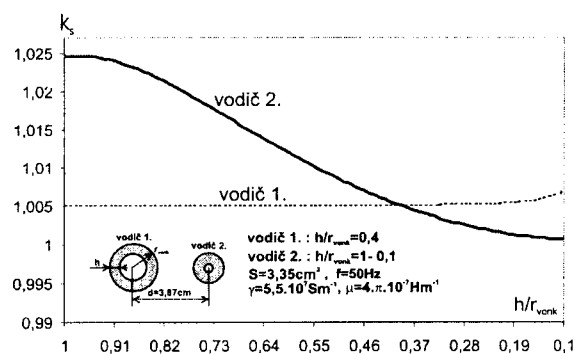
Na obr. 8 je znázornená funkcia $k_s = f(\pi_2)$ pre oba vodiče. U prvého vodiča sa koeficient k_s nemení, nakoľko pre tento je $\pi_2' = \text{konšt.}$ u druhého vodiča

prirodzene klesá so zmeňujúcou sa pomernou hrúbkou vodiča (π_2).

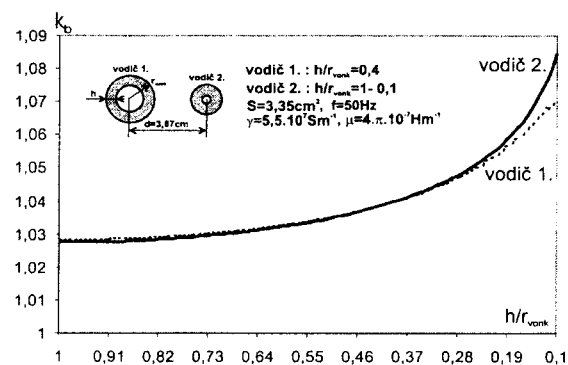
Funkciu $k_b = f(\pi_2)$ vyjadruje obr. 9. Podobne ako na obr. 5, aj tento potvrdzuje skutočnosť, že koeficient proximity efektu pri konštantnej vzdialenosti vodičov rastie s poklesom pomernej hrúbky vodičov, na oboch vodičoch približne rovnako.

Výsledkom oboch priebehov je závislosť celkového koeficientu $k_p = f(\pi_2)$. Z obr. 10 je evidentné, že pri relatívne vyšších hodnotách pomernej hrúbky vodičov sa na druhom vodiči výraznejšie prejavuje vplyv skinefektu, čo korešponduje s výsledkami v 4. kapitole.

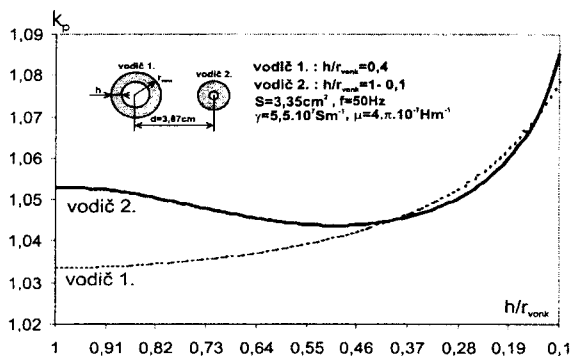
Napokon, pomocou týchto výsledkov stanovená zmena celkového odporu dvojice vodičov je znázornená na obr. 11. Pozornosť si zaslúži konštatovanie, že minimálnu hodnotu celkový odpor má v hraniciach, zodpovedajúcich približnej rovnosti tvaru oboch vodičov.



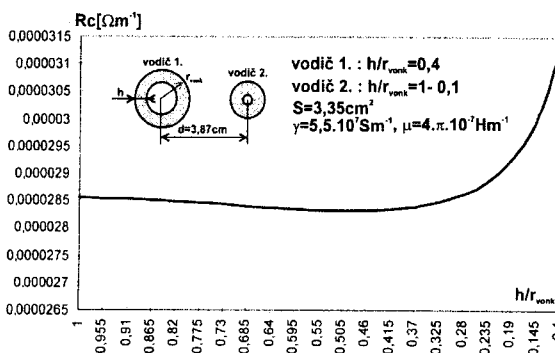
Obr. 8. Skinefekt vodičov rôznych tvarov prierezu
Fig. 8. Skineffect of conductors with different shape of cross-section



Obr. 9. Efekt blízkosti vodičov rôznych tvarov prierezu
Fig. 9. Effect of closeness of conductors with different shape of cross-section



Obr. 10. Koeficient povrchových javov vodičov rôznych tvarov prierezu
Fig. 10. Skineffect coefficient of conductors with different shape of cross-section



Obr. 11. Celkový odpor dvojice vodičov s rôznymi tvarmi prierezu
Fig. 11. Total resistance of two conductors with different shape of cross-section

6. ZÁVER

Výsledky prezentované v 4. a 5. časti príspevku sú prirodzene len prierezové. Celkové skúsenosti z využívania numerickej metódy elementárnych vodičov na pracovisku sú však natoľko pozitívne, že umožňujú konštatovať najmenej dve skutočnosti. Sú to:

- široká použiteľnosť metódy elementárnych vodičov na analýzu povrchových javov v osamotenom vodiči, jednofázovom zväzkovom vodiči i v trojfázovom zväzku
- univerzálnosť výsledkov analýzy povrchových javov, vyjadrovaním závislosti predmetných koeficientov k_s , k_b a k_p od bezrozmerných premenných a parametrov. Táto okolnosť podstatne uľahčuje praktickú stránku a zvyšuje objektivitu určovania odporu vodiča resp. zväzku vodičov v bežných konfiguráciách.

Záujem o túto problematiku na pracovisku autora vyplynul z požiadaviek praxe na komplexné a objektívne hodnotenie impedančných pomerov vedení nízkoohmových spotrebičov. Napokon nie sú to len elektrické taviace pece, ale aj ďalšie elektrické agregáty, ktoré sú napájané striedavými prúdmi vyššími ako 1kA, resp. ktorých frekvencie sú nad hodnotou sieťovej, t.j. 50Hz.

LITERATÚRA

- [1] NOVÁK, P.: Základy elektrotepelnej techniky, učebné texty. 1. vydanie. Košice: Mercury – Smékal, 2001. ISBN 80-89061-48-6
- [2] DANCIS, J. a B.: Korotkije seti i električeskije parametry dugovyh elektropečej. Moskva: Metallurgija, 1974
- [3] NOVÁK, P.: Konštrukcia a prevádzka elektrotepelných zariadení, učebné texty. 1. vydanie. Košice: Edičné stredisko VŠT, 1986.
- [4] WINKLER, G.: VEM – Handbuch Hochstromtechnik: Grundlagen. Dimensionierung und Ausführung von Hochstromanlagen, Berlin, VEB Verlag Technik, 1987
- [5] BABARÍK, P.: Metódy riešenia povrchových javov s aplikáciou na prívody nízkoohmových spotrebičov: Písomná práca k dizertačnej skúške. KEE FEI TU Košice, 1997
- [6] NOVÁK, P.: Vyšetrovanie niektorých elektrotepelných zariadení metódou fyzikálneho modelovania. In: Elektrotechnický časopis, roč. 31, 1980, č. 3, s. 234-248
- [7] BABARÍK, P.: Analýza impedančných pomerov prívodov nízkoohmových spotrebičov. Dizertačná práca, KEE FEI TU Košice, 1999
- [8] NOVÁK, P. - BABARÍK, P.: Prenosová schopnosť sekundárnych prívodov elektrických pecí pracujúcich v nízkoohmovom režime. Elektroenergetika EE 2001, 1. medzinárodné vedecké sympóziu, Vysoké Tatry – Stará Lesná, KEE FEI TU Košice, 2001, s. 203-206. ISBN 80-88922-34-8