

Dariusz KUSIAK*, Tomasz SZCZEGIELNIAK*, Zygmunt PIĄTEK*

ASYMETRIA POLA MAGNETYCZNEGO EKRANOWANEGO TRÓJFAZOWEGO JEDNOBIEGUNOWEGO PŁASKIEGO TORU WIELKOPRĄDOWEGO

W pracy wykazano, że rozkład pola magnetycznego w dwóch zewnętrznych fazach trójfazowego ekranowanego płaskiego toru wielkoprądowego jest niesymetryczny. Składowe tego pola uwzględniają pola magnetyczne oddziaływania zwrotnego prądów wirowych indukowanych w sąsiednich przewodach fazowych w wyniku zjawiska zbliżenia oraz zjawiska naskórkowości. Rozkłady pola w obszarze zewnętrznym faz skrajnych przedstawiono w funkcji parametrów uwzględniających częstotliwość prądu, konduktywność i wymiary poprzeczne przewodów rurowych.

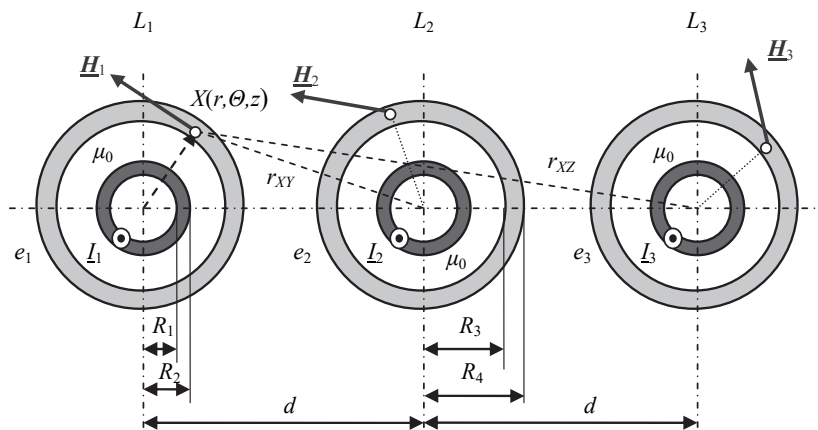
SŁOWA KLUCZOWE: pole magnetyczne, przewód rurowy, ekran rurowy, tor wielkoprądowy, rozkład niesymetryczny.

1. WPROWADZENIE

Metalowa osłona dla własnego przewodu fazowego jest tzw. ekranem otwartym co oznacza, że pole magnetyczne w jej obszarze zewnętrznym jest takie jak dla przypadku braku osłony. Własne pole magnetyczne w tym obszarze jest równe polu wytworzonemu przez nitkowy przewód fazowy z własnym prądem fazowym [1-5]. Oznacza to, że rurowe przewody fazowe mogą być zastąpione przez przewody nitkowe [6-8] odpowiednio z prądami I_1 , I_2 , oraz I_3 – rysunek 1. Wówczas pole magnetyczne w obszarze zewnętrznym jest polem wytworzonym przez prądy fazowe płynące w nitkowych przewodach fazowych oraz prądy wirowe indukowane w ekranach. Te ostatnie prądy generują tzw. pole magnetyczne oddziaływania zwrotnego [9, 10].

W pracy pokazano, że w dwóch przewodach zewnętrznych trójfazowego płaskiego ekranowanego toru wielkoprądowego rozkład pola magnetycznego nie jest jednakowy pomimo symetryczności geometrii układu [11].

* Politechnika Częstochowska



Rys. 1. Trójfazowy ekranowany płaski tor wieloprądowy

2. ROZKŁAD POŁA MAGNETYCZNEGO

Dla płaskiego ekranowanego trójfazowego toru wieloprądowego, przedstawionego na rysunku 1, pole magnetyczne pochodzenia zewnętrznego \underline{H}^w indukuje w ekranie prądy wirowe (\underline{H}^w jest polem wytworzonym przez źródło zewnętrzne w stosunku do osłony) [15]. Pola te pochodzące tylko od prądów w fazach sąsiednich, dla faz skrajnych mają postać [12, 13]:

$$\underline{H}_{123}^w(r, \theta) = \underline{H}_{12}^w(r, \theta) + \underline{H}_{13}^w(r, \theta) \quad (1)$$

i odpowiednio

$$\underline{H}_{312}^w(r, \theta) = \underline{H}_{31}^w(r, \theta) + \underline{H}_{32}^w(r, \theta) \quad (2)$$

Dla symetrycznej trójki prądów fazowych [14, 15]

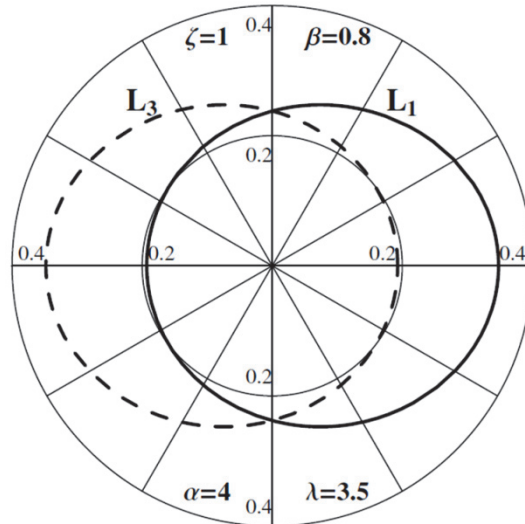
$$\underline{I}_2 = \exp\left[-j \frac{2}{3} \pi\right] \underline{I}_1 \quad (3)$$

oraz

$$\underline{I}_3 = \exp\left[j \frac{2}{3} \pi\right] \underline{I}_1 \quad (4)$$

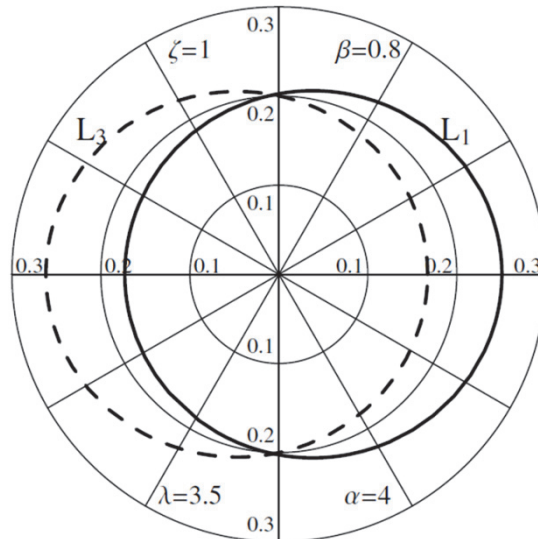
moduły tych pól są odpowiednio symetryczne – rysunek 2 [16].

Pola te indukują prądy wirowe, które wywołują pola magnetyczne oddziaływania zwrotnego $\underline{H}_{123}^{oz}(r, \theta)$ oraz $\underline{H}_{321}^{oz}(r, \theta)$. Pola te są nadal w fazach skrajnych odpowiednio symetryczne ze względu na ich identyczny mechanizm powstawania w stosunku do odpowiednich pól $\underline{H}_{123}^w(r, \theta)$ oraz $\underline{H}_{321}^w(r, \theta)$ – rysunek 3.



Rys. 2. Rozkład modułów pola magnetycznego pochodzenia zewnętrznego (bez pola magnetycznego własnej fazy) w fazach skrajnych trójfazowego płaskiego ekranowanego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami L_1 , L_2 , i L_3

$$(\lambda=d/R_4 (\lambda \geq 1), \xi=r/R_4, \beta=R_3/R_4 (0 \leq \beta < 1), \alpha = R_4/\delta = R_4 \sqrt{(\omega \mu \gamma)/2})$$



Rys. 3. Rozkład modułów pola magnetycznego oddziaływania zwrotnego w fazach skrajnych trójfazowego płaskiego ekranowanego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami L_1 , L_2 , i L_3

Pola magnetyczne na zewnątrz przewodów, bez pól własnych, mają postać:

$$\underline{H}_{123}^{zew}(r, \theta) = \underline{H}_{123}^w(r, \theta) + \underline{H}_{123}^{oz}(r, \theta) \quad (5)$$

oraz

$$\underline{H}_{321}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{321}^w(r, \Theta) + \underline{H}_{321}^{oz}(r, \Theta) \quad (6)$$

Pola te pozostają względem siebie nadal odpowiednio symetryczne – rys. 4.

Całkowite pola magnetyczne na zewnątrz przewodów faz skrajnych wyrażamy wzorami [17, 18]

$$\underline{H}_{11}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{11}^{zew}(r) + \underline{H}_{12}^{zew}(r, \Theta) + \underline{H}_{13}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{11}^{zew}(r) + \underline{H}_{123}^{zew}(r, \Theta) \quad (7)$$

oraz

$$\underline{H}_{33}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{33}^{zew}(r) + \underline{H}_{31}^{zew}(r, \Theta) + \underline{H}_{32}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{33}^{zew}(r) + \underline{H}_{321}^{zew}(r, \Theta) \quad (8)$$

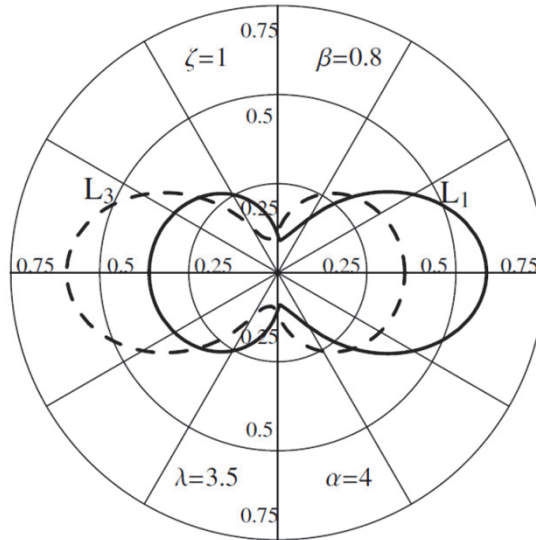
Pola $\underline{H}_{11}^{zew}(r)$ i $\underline{H}_{33}^{zew}(r)$ mają tylko składowe styczne. Można zatem powyższe dodawanie wektorowe ograniczyć do dodawania odpowiednich składowych stycznych. Dodawanie to jest operacją w dziedzinie liczb zespolonych, a stąd o sumach zespolonych składowych stycznych [19, 20]

$$\underline{H}_{1\Theta}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{11\Theta}^{zew}(r) + \underline{H}_{12\Theta}^{zew}(r, \Theta) + \underline{H}_{13\Theta}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{11\Theta}^{zew}(r) + \underline{H}_{123\Theta}^{zew}(r, \Theta) \quad (9)$$

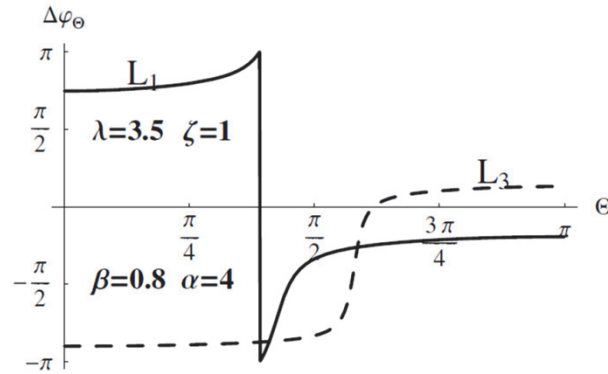
oraz

$$\underline{H}_{3\Theta}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{33\Theta}^{zew}(r) + \underline{H}_{31\Theta}^{zew}(r, \Theta) + \underline{H}_{32\Theta}^{zew}(r, \Theta) = \underline{H}_{33\Theta}^{zew}(r) + \underline{H}_{321\Theta}^{zew}(r, \Theta) \quad (10)$$

decydują nie tylko moduły składowych sumy, lecz także ich argumenty, a ściślej różnica argumentów. Rozkład tych różnic dla faz skrajnych przedstawiono na rysunku 5.

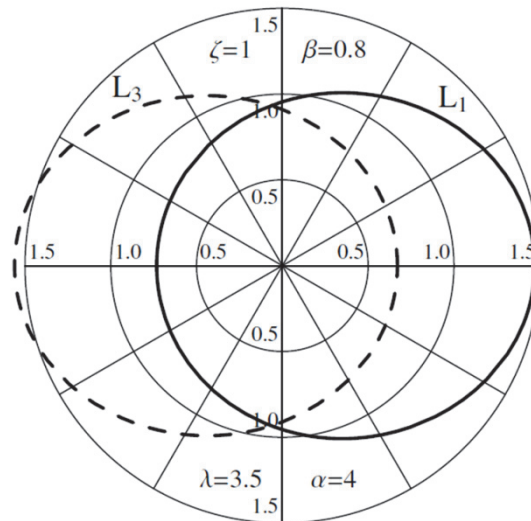


Rys. 4. Rozkład modułów pola magnetycznego na zewnątrz faz skrajnych (bez pola magnetycznego własnej fazy) płaskiego ekranowanego toru wieloprowadowego z symetrycznymi prądami I_1 , I_2 , i I_3



Rys. 5. Rozkład różnic argumentów składowej stycznej pola własnej fazy i składowej stycznej pola na zewnątrz (bez pola magnetycznego własnej fazy) faz skrajnych trójfazowego płaskiego ekranowanego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami L_1 , L_2 , i L_3

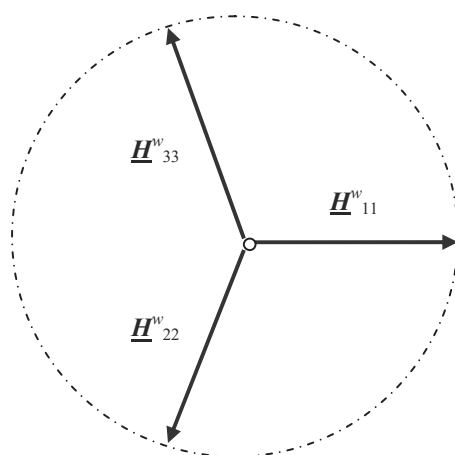
Z rysunku 5 wynika, iż mimo jednakowych modułów pól własnych faz i jednakowych modułów pól na zewnątrz faz skrajnych, odpowiednie sumy składowych stycznych w dziedzinie liczb zespolonych nie będą mieć jednakowych modułów. W konsekwencji całkowite pole magnetyczne, z uwzględnieniem pola magnetycznego fazy własnej, na zewnątrz faz skrajnych nie jest odpowiednio symetryczne – rysunek 6. Asymetria ta pogłębia się w miarę wzrostu częstotliwości prądu, konduktywności i promienia zewnętrznego przewodów, czyli parametru α .



Rys. 6. Rozkład modułów całkowitego pola magnetycznego na zewnątrz przewodów faz skrajnych trójfazowego płaskiego ekranowanego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami L_1 , L_2 , i L_3

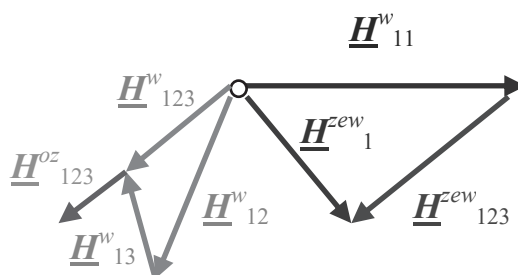
3. WYKRESY WSKAZOWE

Zagadnienie asymetrii rozkładu pola magnetycznego na zewnątrz przewodów faz skrajnych trójfazowego płaskiego toru wieloprądowego można także wyjaśnić przy pomocy wykresów wskazowych. Zakłada się symetryczną trójkę pola magnetycznego własnych prądów fazowych – rysunek 7.

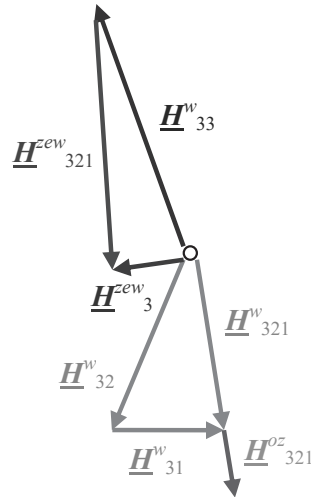


Rys. 7. Własne pola magnetyczne na zewnątrz przewodów trójfazowego płaskiego ekranowanego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami L_1 , L_2 , i L_3

W pewnych, symetrycznych względem osi fazy środkowej, punktach na powierzchniach zewnętrznych przewodów faz skrajnych można założyć, że pola magnetyczne oddziaływań zwrotnych prądów wirowych dodają się wektorowo i w dziedzinie liczb zespolonych z odpowiednimi polami, które prądy te wyidukowały, np. dla fazy L_1 w punkcie $\theta = \pi$ (rys. 8) i odpowiadającym (symetrycznym względem osi fazy środkowej) mu punkcie $\theta = 0$ dla fazy L_3 (rys. 9).



Rys. 8. Wykres wskazowy pola magnetycznego dla fazy skrajnej L_1 trójfazowego ekranowanego płaskiego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami L_1 , L_2 , i L_3



Rys. 9. Wykres wskazowy pola magnetycznego dla fazy skrajnej L_3 trójfazowego ekranowanego płaskiego toru wieloprądowego z symetrycznymi prądami I_1 , I_2 , i I_3

4. WNIOSKI

Całkowite pole magnetyczne na zewnątrz faz skrajnych 3-fazowego płaskiego ekranowanego toru wieloprądowego jest asymetryczne – rysunek 6. Ta asymetria wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości prądu, , konduktywności i promienia zewnętrznego przewodów. Z przedstawionych wykresów wskazowych wynika, że w pewnym punkcie ($r = R_2$, $\Theta = \Theta_0$) na powierzchni zewnętrznej fazy L_1 moduł całkowitego pola magnetycznego na zewnątrz przewodu różni się od modułu całkowitego pola w symetrycznym punkcie na powierzchni zewnętrznej przewodu fazy L_3 . W podanym przykładzie $\left| \underline{H}_1^{zeW}(r = R_2, \Theta = \Theta_0) \right| > \left| \underline{H}_3^{zeW}(r = R_2, \Theta = \Theta_0) \right|$. W innych punktach może zachodzić nierówność odwrotna lub równość.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 020/RID/2018/19, kwota finansowania 12 000 000 PLN.

LITERATURA

- [1] Piątek Z., Szczegielniak T., Kusiak D., Magnetic field around flat high-current gas-insulate three-phase enclosed busducts, AMTEE 2015, Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering, 6th–8th September, 2015, Třebíč, Czech Republic.

- [2] Piątek Z., Kusiak D., Szczegielniak T., Magnetic field of the three phase flat high current busduct (in Polish), *Zesz. Nauk. Pol. Śl.* 2009, *Elektryka*, z.1(209), pp. 51–65.
- [3] Koch H., *Gas-Insulated Transmission Lines*, John Wiley&Sons, 2012.
- [4] Kusiak D., Piątek Z., Szczegielniak T., The importance of the distance between conductors and screen in a screened 3-phase symmetrical high current busduct, IC-SPETO 2011, XXXIV Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów/34th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, 18–21.05.2011, pp. 15–16, Gliwice–Ustroń.
- [5] Kusiak D., Piątek Z., Szczegielniak T., Illustration of the elliptical field in the screened flat 3-phase high current busduct, *Computer Applications in Electrical Engineering*, Publishing House of Poznan University of Technology, Vol. 10, Edited by Ryszard Nawrowski, pp. 80–97, 2012.
- [6] Kusiak D., Piątek Z., Szczegielniak T., Influence of changing the distance between the conductors on the total magnetic field of unshielded three-phase flat high current busduct, AMTEE'11, Tenth International Conference on Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering, September 6–9, 2011, Klatovy, Czech Republic, s. II15-II-16.
- [7] Piątek Z., Szczegielniak T., Kusiak D., Magnetic Field in the Three-Phase Shielded Busbars Systems, CPEE 2014. The 15th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. 9th–12th of September, Terchova-Vratna dolina, Slovak Republic. Proceedings of Abstracts, s.48, ISBN: 978-80-554-0910-8, 2014.
- [8] Jabłoński P., Kusiak D., Szczegielniak T., Approximate bem analysis of time-harmonic magnetic field nearby thin-shielded three-phase flat bus duct, IC-SPETO 2013, XXXVI Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki I Teorii Obwodów, 22–25.05.2013, pp. 21–22, Gliwice–Ustroń, 2013.
- [9] Piątek Z., Kusiak D., Szczegielniak T., The impact of the displacement of the both the tubular conductor and screen axes on the magnetic field in high current busducts, CPEE 2010, "Computational Problems of Electrical Engineering", Proceedings, pp. 22, Lazne Kynzvar, Czech Republic 2010.
- [10] Kusiak D., Szczegielniak T., Electromagnetic calculations of busbars (in Polish), 177s., Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, seria Monografie nr 326, 2017.
- [11] Cao M., Biringer P.P., Asymmetry in bus bars due to proximity effects, *Journal of Applied Physics*, Volume 67, Issue 9, May 1, 1990, pp. 4729–4731.
- [12] Szczegielniak T., Piątek Z., Kusiak D., Magnetic Field Around the Screened Three-Phase High-Current Busducts, *Computer Applications in Electrical Engineering*, Vol.14, pp. 14–24, 2016.
- [13] Kusiak D., The importance of an impact of the distance between conductors on the magnetic field of a three-phase, single-pole, shielded, flat high current busduct (in Polish), *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Iss.93, pp. 109–120, 2018.
- [14] Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A., Analysis of electric field distribution in the optimization of three-phase high-current busducts operating in a flat system (in Polish), *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSSN 0033-2097, R. 82, Nr 12, 2006, pp. 49–52.

- [15] Piątek Z., Modeling of lines, cables and high-current busducts (in Polish), Wyd. Pol. Częst., Czestochowa 2007.
- [16] Gliński H., Grzymkowski R., Kapusta A., Słota D., Mathematica 8 (in Polish), Wyd. Prac. Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2012.
- [17] Piątek Z., Kusiak D., Szczegielniak T., Influence of the screen on the magnetic field of the flat three phase high current busduct. Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, Nr 1/2010, pp. 89–91.
- [18] Piątek Z., Impedances of Tubular High Current Busducts. Series Progress in High-Voltage technique, Vol. 28, Polish Academy of Sciences, Committee of Electrical Engineering, Wyd. Pol. Częst., Czestochowa 2008.
- [19] Kusiak D., Piątek Z., Szczegielniak T., The asymmetry of the magnetic field distribution in a flat unshielded 3-phase high current busduct, Acta Technica Jaurinensis, Vol. 6, nr 1, pp. 49–55, 2013.
- [20] Kusiak D., Piątek Z., Szczegielniak T., Magnetic field in the monophas single-pole bifilar high-current busduct, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 3a, pp. 64–66, 2012.

**ASYMMETRY OF THE MAGNETIC FIELD IN A THREE-PHASE,
SINGLE-POLE SCREENED FLAT HIGH CURRENT BUSDUCT**

It has been demonstrated in the paper that the magnetic field distribution in two outer conductors of the flat, three-phase single-pole screened, high-current busduct is asymmetric. The components of this field reflect the magnetic field of the reverse reaction fields of the eddy currents induced in the conductors of the adjacent phases as the results of the proximity effect and the skin effect. The field distribution is shown in the outer area of the outer phases as the function of the parameters reflecting the current frequency, the conductivity, and the transverse dimensions of the tubular conductors.

(Received: 12.02.2019, revised: 13.03.2019)

