

Zastosowanie numerycznej symulacji do analizy torów wieloprądowych w procesie nagrzewania indukcyjnego rur z uwzględnieniem zjawisk elektromagnetycznych

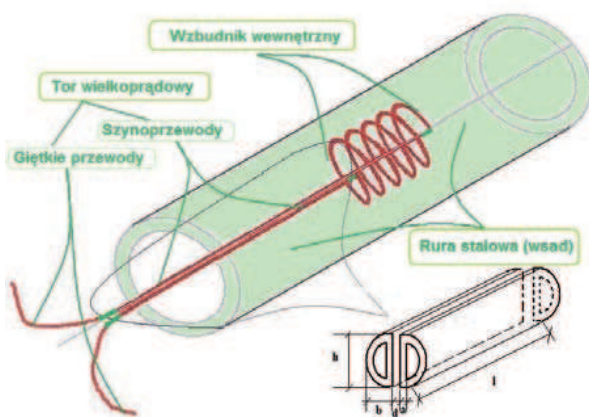
Joanna Kolańska-Płuska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

Układy do nagrzewania indukcyjnego są złożone ze źródła zasilania, toru wieloprądowego, wzbudnika oraz wsadu [2]. Źródła napięcia zasilające wzbudniki to przede wszystkim nowoczesne przemienniki częstotliwości, będące urządzeniami tranzystorowymi ze sterownikami mikroprocesorowymi. Zwiększają one częstotliwość prądu zasilającego cewki nagrzewające w bardzo różnym zakresie w zależności od przeznaczenia hartowanej rury. Umożliwiają także precyzyjne sterowanie parametrami całego procesu nagrzewania indukcyjnego. Aby zapewnić optymalne warunki pracy takich przemienników, należy odpowiednio dobrać parametry pozostałych elementów układu, ograniczając wartości rezystancji i reaktancji do wartości możliwie najmniejszych. Nowoczesne pakiety komputerowe są przydatnym narzędziem na etapie projektowania, umożliwiającym wykonanie symulacji dla różnych konfiguracji geometrycznych torów. Również prace [4–6, 9] pozwalają na wyznaczenie macierzy impedancyjnej toru jako funkcjonału pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem zjawisk naskórkowości i zbliżenia. Dla wytypowanych geometrii toru przeprowadzono wielowariantowe obliczenia, których wybrane wyniki zostały przedstawione w pracy.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, nagrzewanie indukcyjne, hartowanie indukcyjne, naskórkowość, efekt zbliżenia

Tory wieloprądowe stosowane w układach nagrzewania indukcyjnego są niezwykle różnorodne [1, 3]. Konstruując tor będący częścią układu zasilana nagrzewnic należy stosować takie konfiguracje i wymiary geometryczne, dla których rezystancja i reaktancja są możliwie małe. Obliczenie macierzy impedancji toru wieloprądowego o skończonej długości z uwzględnieniem zjawiska naskórkowości i zbliżenia jest skomplikowane. W pracy przedstawiono wyniki wielowariantowej symulacji toru o długości 2 m wiodącego prąd o natężeniu 2 kA, zasilanego ze źródła napięcia o częstotliwości 12kHz. Dla tak określonych parametrów wybrano trzy konstrukcje torów i przedstawiono wybrane wyniki.



Rys. 1. Wsad rurowy z wzbudnikiem wewnętrznym

Fig. 1. Tubular workpiece by means of the internal inductor

Na rys. 1 przedstawiono fragment układu nagrzewnic indukcyjnej stosowanej do nagrzewania rur od wewnątrz z szynoprzewodami zasilającymi wzbudnik wewnętrzny w kształcie rozciętego okręgu.

Tor wieloprądowy złożony z dwóch przewodów o przekroju rozciętego okręgu

Zadany jest układ dwóch przewodów prostoliniowych o długości $l=2$ m, przekroju rozciętego okręgu o wysokości $h=20$ mm, szerokości $b=10$ mm, oddalonych od siebie o $d=2$ mm, przewodności elektrycznej γ , wykonanych z materiału nieferromagnetycznego o przenikalności magnetycznej μ_0 (rys. 1).

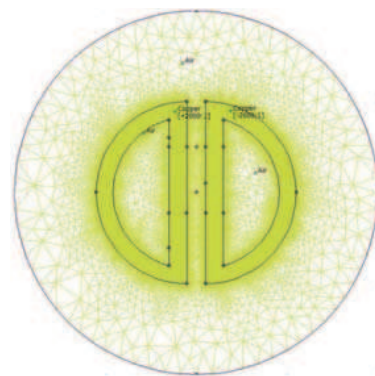
Do symulacji w programie FEMM zastosowano siatkę obliczeniową złożoną z 219 490

węzłów i 438 906 elementów trójkątnych (rys. 2). Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 1.

Na rys. 3 przedstawiono wykres części rzeczywistej zespolonego potencjału wektorowego \underline{A} . Na rys. 4a przedstawiono rozkład gęstości prądu, natomiast na rys. 4b – rozkład natężenia pola magnetycznego w omawianym przekroju.

Tor wieloprądowy złożony z czterech przewodów kwadratowych

Zadany jest układ czterech przewodów prostoliniowych o długości $l=2$ m, przekroju kwadratowym o boku $b=10$ mm, przewodności elektrycznej γ , wykonanych z materiału niefer-



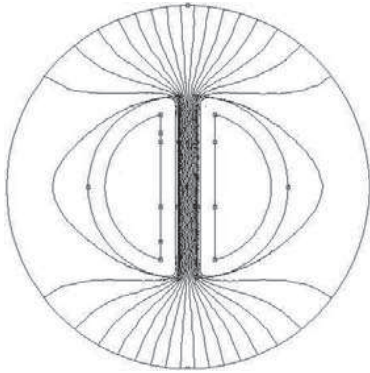
Rys. 2. Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego szynoprzewodu o przekroju rozciętego okręgu

Fig. 2. Discretization of wire track area calculation section as a slashed circle

Tab. 1. Wyniki obliczeń dla jednego profilu

Tab. 1. The results of calculations for a single profile

Moduł prądu (A)	2000
Napięcie zespolone (V)	4,55489+j20,4692
Impedancja (napięcie/prąd) (Ω)	0,00227745+j0,0102346
Moc czynna (W)	4554,89
Moc bierna (Var)	20469,2
Moc pozorna (VA)	20969,8

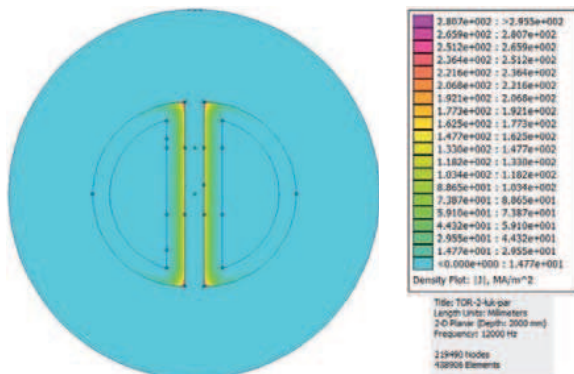


Rys. 3. Rozkład linii sił pola dla omawianego przekroju

Fig. 3. Real component of \underline{A} for this section

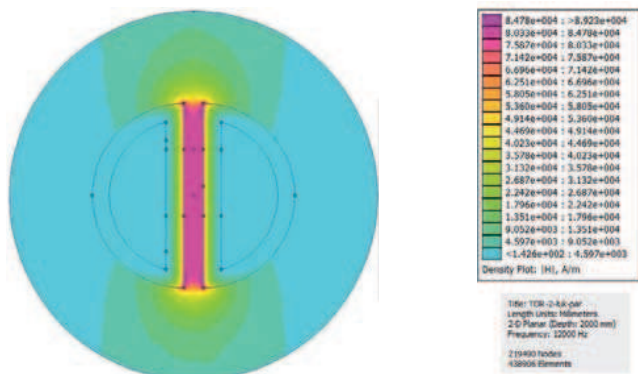
romagnetycznego o przenikalności magnetycznej μ_0 , oddalonych od siebie o 2 mm.

Zastosowano siatkę obliczeniową złożoną z 326 892 węzłów i 653 705 elementów trójkątnych (rys. 5). Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 2, natomiast rozkład gęstości prądu oraz natężenia pola magnetycznego przedstawiono na rys. 7a i 7b.



Rys. 4a. Rozkład gęstości prądu toru

Fig. 4a. Distribution of current density of the track



Rys. 4b. Rozkład natężenia pola magnetycznego toru

Fig. 4b. The distribution of magnetic field strength of the track

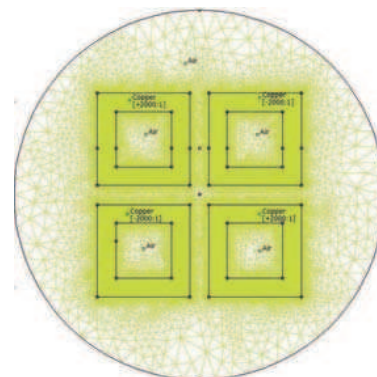
Tor wieloprowadowy złożony z dwóch przewodów prostokątnych

Zadany jest układ dwóch przewodów prostoliniowych o długości $l = 2$ m, przekroju prostokątnym o bokach 10×20 mm, przewodności elektrycznej γ , wykonanych z materiału nieferromagnetycznego o przenikalności magnetycznej μ_0 . Odległość między przewodami wynosi 2 mm.

Tab. 2. Wyniki obliczeń dla jednego profilu

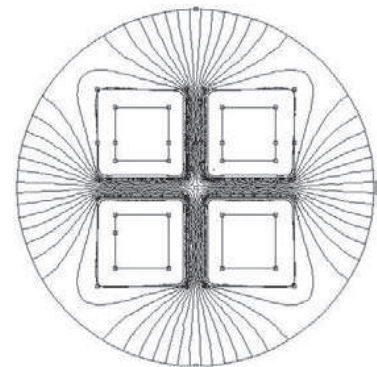
Tab. 2. The results of calculations for a single profile

Moduł prądu (A)	2000
Napięcie zespolone (V)	9,50748+j40,0976
Impedancja (napięcie/prąd) (Ω)	0,00475374+j0,0200488
Moc czynna (W)	9507,48
Moc bierna (Var)	40097,6
Moc pozorna (VA)	41209,3



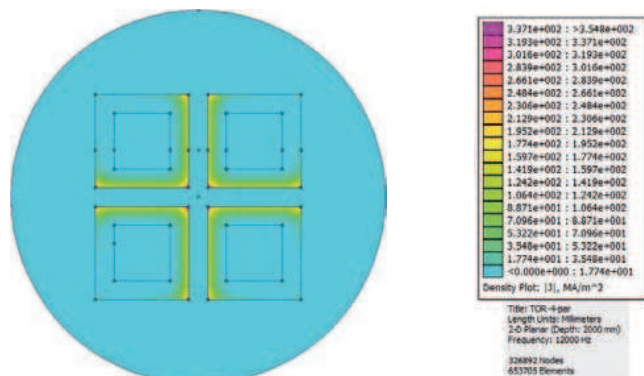
Rys. 5. Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego

Fig. 5. Discretization of computational area



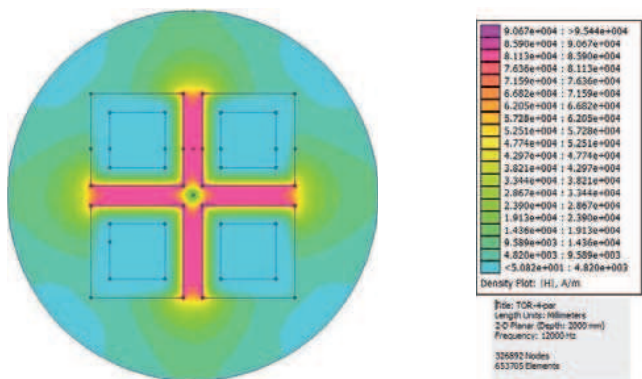
Rys. 6. Rozkład linii sił pola dla omawianego przekroju

Fig. 6. Real component of \underline{A} for this section



Rys. 7a. Rozkład gęstości prądu toru

Fig. 7a. Distribution of current density in the track



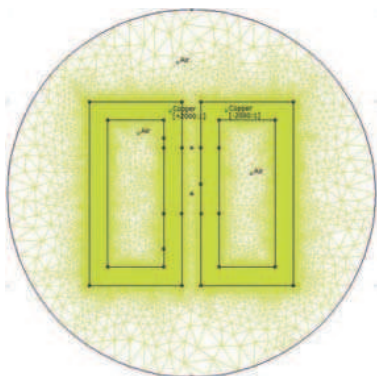
Rys. 7b. Rozkład natężenia pola magnetycznego toru
Fig. 7b. The distribution of magnetic field strength of the track

Zastosowana siatka obliczeniowa złożona jest z 266 637 węzłów i 533 194 elementów trójkątnych (rys. 8). Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 3.

Tab. 3. Wyniki obliczeń dla jednego profilu

Tab. 3. The results of calculations for a single profile

Moduł prądu (A)	2000
Napięcie zespolone (V)	4,4291+j20,2065
Impedancja (napięcie/prąd) (Ω)	0,00221455+j0,0101033
Moc czynna (W)	4429,1
Moc bierna (Var)	20206,5
Moc pozorna (VA)	20686,2



Rys. 8. Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego szynoprzewodu o przekroju prostokątnym

Fig. 8. Discretization calculations area of rectangular cross-section

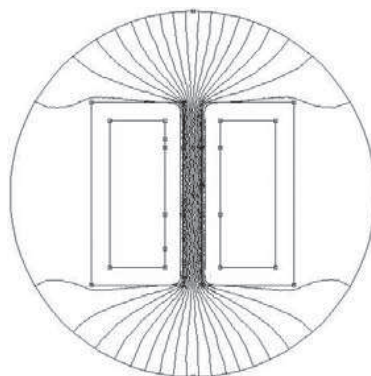
Ze względu na najmniejszą wartość impedancji wejściowej profilu o przekroju prostokątnym, $Z=0,00221455+j0,0101033 \Omega$, profil ten poddano dalszej analizie.

Między końcami przewodów wymuszone są sinusoidalnie zmienne w czasie różnice potencjałów o pulsacji ω , których wartości zespolone wynoszą \underline{U}_1 i \underline{U}_2 (rys. 10).

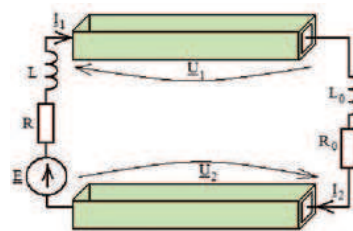
Wymuszone w ten sposób pole elektryczne wynoszące $-\text{grad}V(X)$ powoduje wewnątrz przewodów przepływ prądów o gęstości zespolonej $\underline{J}(X)$, który z kolei indukuje wewnątrz tych przewodów i na zewnątrz zespolone pole elektryczne indukcji równe $-j\omega\underline{A}(X)$. Wypadkowe zespolone pole elektryczne przyjmuje wówczas postać [10]:

$$\underline{E}(X) = -\text{grad}V(X) - j\omega\underline{A}(X) \quad (1)$$

gdzie wektorowy potencjał magnetyczny



Rys. 9. Rozkład linii sił pola dla omawianego przekroju
Fig. 9. Real component of \underline{A} for this section



Rys. 10. Schemat układu przewodów szynowych; \underline{E}, R, L – parametry wewnętrzne źródła zasilania, R_0, L_0 – parametry zastępcze wzbudnika i wsadu

Fig. 10. Induction heating diagram; \underline{E}, R, L – power source inside parameters, R_0, L_0 – workpiece and inductor parameters

$$\underline{A}(x_1, x_2, x_3) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{p=1, v^{(p)}}^2 \int \frac{\underline{J}(y_1, y_2, y_3)}{\sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}} dy_1 dy_2 dy_3 \quad (2)$$

w którym $v^{(p)}$ jest obszarem p -tego przewodu. Uwzględniając prawo Ohma

$$\underline{J}(x_1, x_2, x_3) = \gamma \underline{E}(x_1, x_2, x_3) \quad (3)$$

oraz równania (1) i (2), otrzymuje się równanie [7, 8]:

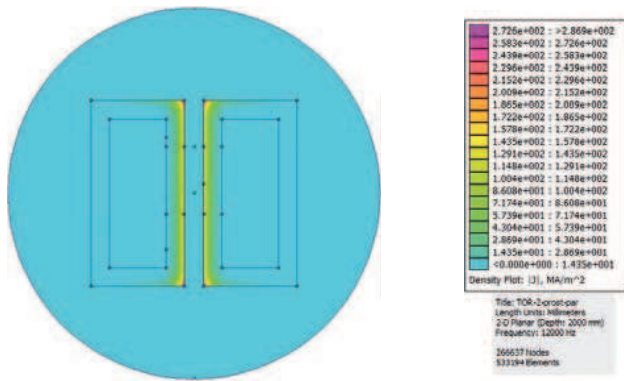
$$-\text{grad}V(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{\gamma} \underline{J}(x_1, x_2, x_3) + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \sum_{p=1, v^{(p)}}^2 \int \frac{\underline{J}(y_1, y_2, y_3)}{\sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}} dy_1 dy_2 dy_3 \quad (4)$$

Mając na uwadze rozwiązanie numeryczne równania całkowego (4), dokonuje się w pierwszej kolejności podziału obszaru całkowania poszczególnych części przewodów na elementy w postaci włókien o przekroju prostokątnym, których pole wynosi: $\Delta S = \Delta x \Delta y$, przy czym N_x i N_y są liczbami podziału poszczególnych boków przekroju przewodu na odcinki.

Jeśli założy się, że wektor gęstości prądu ma tylko jedną składową wzdłuż osi toru, to dzieląc prądy poszczególnych włókien przez $\Delta S = \Delta x \Delta y$ otrzymuje się następujący wzór na rozkład gęstości prądu w s -tym przewodzie:

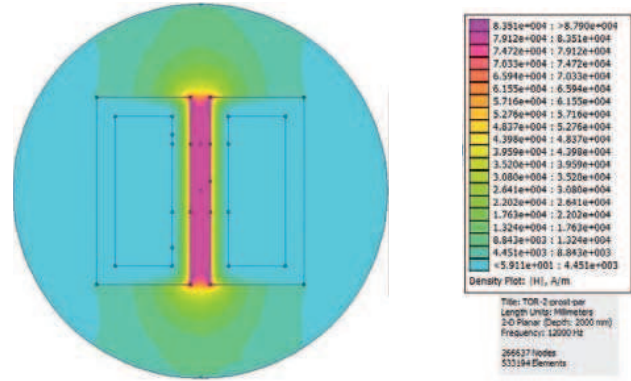
$$\underline{J}_{-n}^{(s)} = \frac{\underline{I}_n^s}{\Delta S} = \frac{1}{\Delta S} \left(\sum_{k=1}^{N_x N_y} \underline{Y}_{n,k}^{(s,1)} \right) (\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}) + \frac{1}{\Delta S} \left(\sum_{k=1}^{N_x N_y} \underline{Y}_{n,k}^{(s,2)} \right) (\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{21}) \quad (5)$$

Jeżeli w układzie zadany jest całkowity prąd $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_3 = -\underline{I}$, to wartość skuteczna $\underline{J}_n^{(s)}$ rozkładu gęstości prądu (5) odniesiona do średniej wartości skutecznej gęstości $\underline{J}_s = I/bh$ wyraża się wzorem



Rys. 11a. Rozkład gęstości prądu toru

Fig. 11a. Distribution of current density of the track



Rys. 11b. Rozkład natężenia pola magnetycznego toru

Fig. 11b. The distribution of magnetic field strength of the track

$$\frac{J^{(s)}}{I_{s1}} = \frac{b \cdot h}{\Delta b \Delta h} \left[\left(\sum_{k=1}^{N_1 N_2} Y_{n,k}^{(s,1)} \right) (\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}) + \left(\sum_{k=1}^{N_1 N_2} Y_{n,k}^{(s,2)} \right) (\underline{Z}_{22} + \underline{Z}_{21}) \right] \quad (6)$$

Dla wybranego przekroju szynoprzewodu sporządzono rozkłady gęstości prądu oraz natężenia pola magnetycznego (rys. 11a i 11b).

Podsumowanie

Za pomocą programu FEMM przeprowadzono wielowariantową symulację komputerową układów o różnej geometrii. Zbadano wpływ kształtu przekroju toru na wartości impedancji wejściowej wyrażonej poprzez stosunek napięcia do prądu. Z wykonanych rozkładów gęstości prądu w przewodach szynowych można zaobserwować zjawisko naskórkowości (badania dla częstotliwości 12 kHz) oraz silny efekt zbliżenia. W pracy przedstawiono jedynie wybrane symulacje dla przewodów oddalonych od siebie o 2 mm i częstotliwości 12 kHz. W każdym przypadku rozpatrywano przewody miedziane o zbliżonym przekroju czynnym. Wykonane symulacje pokazują, że program FEMM jest przydatnym narzędziem do wstępnej i przybliżonej analizy pola magnetycznego. Z powodzeniem może być stosowany do wyznaczania impedancji wejściowych przewodów rurowym o różnym przekroju z uwzględnieniem zjawisk naskórkowości i zbliżenia.

Bibliografia

1. Hering M.: *Podstawy elektrotermii. Część II*. WNT, Warszawa 1998.
2. Davies E.J.: *Conduction and Induction Heating*. Peter Peregrinus Ltd., London 1990.
3. Sajdak C., Samek E.: *Nagrzewanie indukcyjne. Podstawy teoretyczne i zastosowania*. Wyd. Śląsk, Katowice 1987.
4. Rudnew V., Loveless D., Cook R., Black M.: *Handbook of Induction Heating*. Copyright by Marcel Dekker, New York 2003.
5. Barglik J., Doležel I., Karban P., Kwiecień I., Ulrych B.: *Comparison of two ways of induction hardening of long steel tubes*. Proceed. of the XIII Intern. Symp. on Theoretical Electrical Engineering. ISTET'05 Lvov 2005, p. 11–14.
6. Kolańska-Płuska J.: *The Application of FEMM Program for Numerical Analysis of Electromagnetic Field of Rectangle Wires Section in Long Iron Pipes Hardening Process*. XXXII IC SPE-TO, Gliwice 2009, p. 31–32.

7. Strunskij B. M.: *Short electric network of electric furnaces* (in Russian). GN-TIL po Cz. i CM, Moscow 1962.
8. Tozoni O. W., Kolerowa T. J.: *Multiphase industrial busducts*. Naukowa Dumka, Kiev 1966.
9. Baron B., Kolańska-Płuska J.: *Application of Bessel functions and discrete Fourier transform to the analysis of electromagnetic system comprised of conducting solid or annular cylinder and coil wound it*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka Nr 2(206) Politechnika Śląska, Gliwice 2008, p. 33–52.
10. Krakowski M.: *Elektrotechnika teoretyczna. Pole Elektromagnetyczne*. WN PWN, Warszawa 1995. ■

Application of numerical simulation to study the tubular high current bus-ducts in the value determination process of induction heating pipes, taking into account electromagnetic phenomena

For induction heating systems are made of a power source circuit, inductor and tubular workpiece. Sources of supply voltage inductors are primarily modern frequency converters, which are devices driver transistor microprocessor. They increase the frequency of the supply current heating coil in a very different extent depending on the use of hardened pipe. Also allow precise control of the process parameters of induction heating. To ensure optimum operation of such converters should be appropriately chosen parameters of the other elements of the system, reducing resistance and reactance values for the smallest possible value. Modern computer packages are therefore a useful tool in the design phase, enabling the execution of simulations for different geometrical configurations of track. Also allow the appointment of the track impedance matrix as a functional of the electromagnetic field, taking into account skin effect and proximity effects. For the selected track geometry calculations were carried out multi-variant, which selected results are presented in the work.

Keywords: electromagnetic field, induction heating, induction hardening, skin effect, proximity effect

dr inż. Joanna Kolańska-Płuska

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej

e-mail: j.kolanska-pluska@po.opole.pl

