Politechnika Częstochowska

Wydział Elektryczny

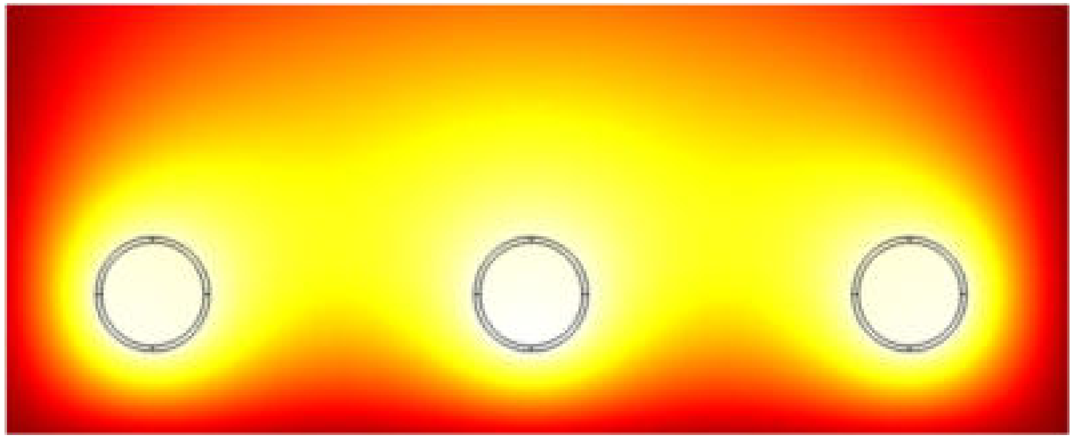
Wybrane prace naukowe i badawcze prowadzone w Katedrze Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej

Paweł Jabłoński, Częstochowa 2021

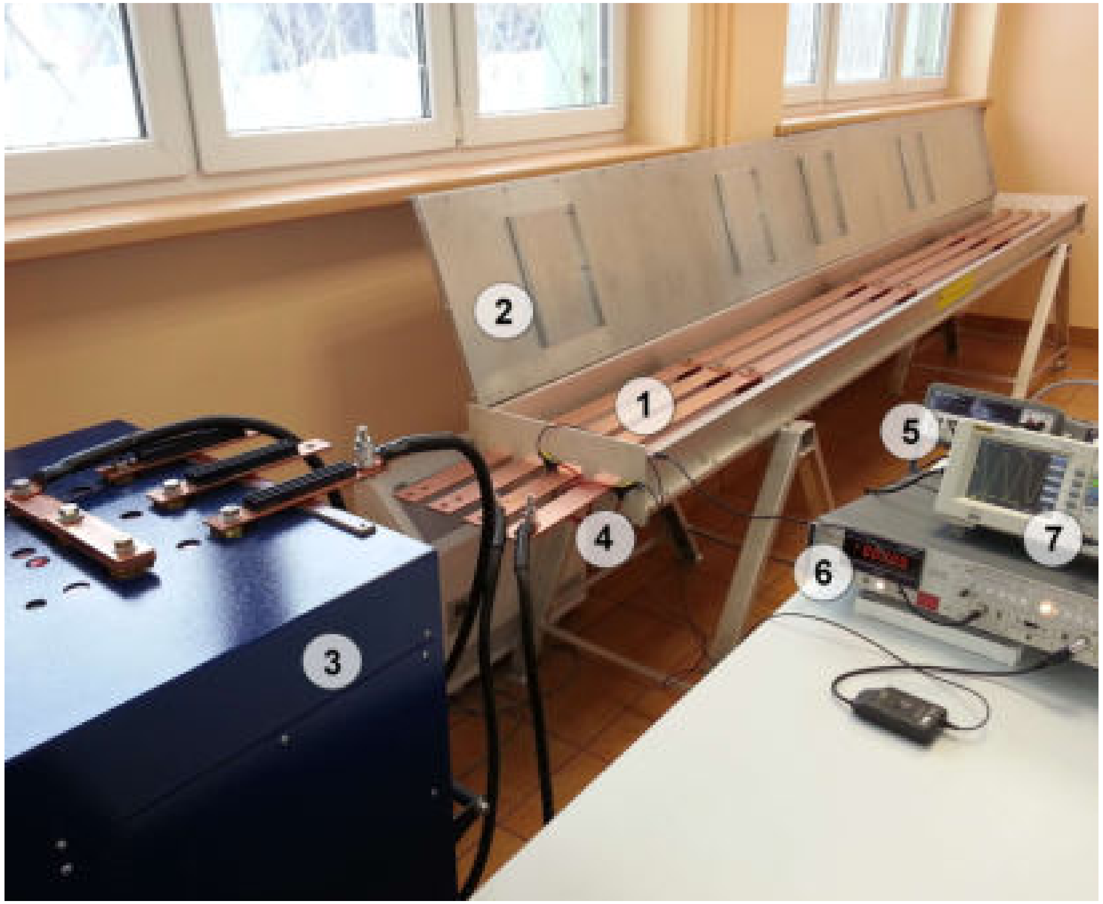
Prace badawcze i naukowe w KAEiO związane z teorią pola i teorią obwodów

- Tory wielkoprądowe
- Straty w materiałach magnetycznych
- Ogrzewanie rozjazdów kolejowych metodą indukcyjną
- Wykorzystanie analizy polowej w badaniach nieniszczących
- Metoda elementów brzegowych w analizie pola EM

Badania i prace dotyczące torów (wielko)prądowych



Stanowisko laboratoryjne

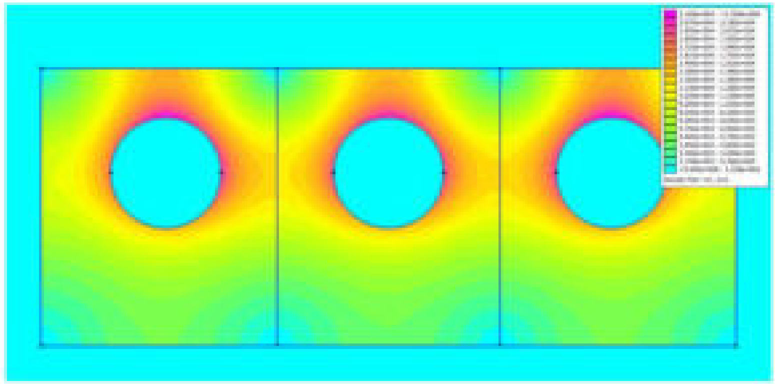


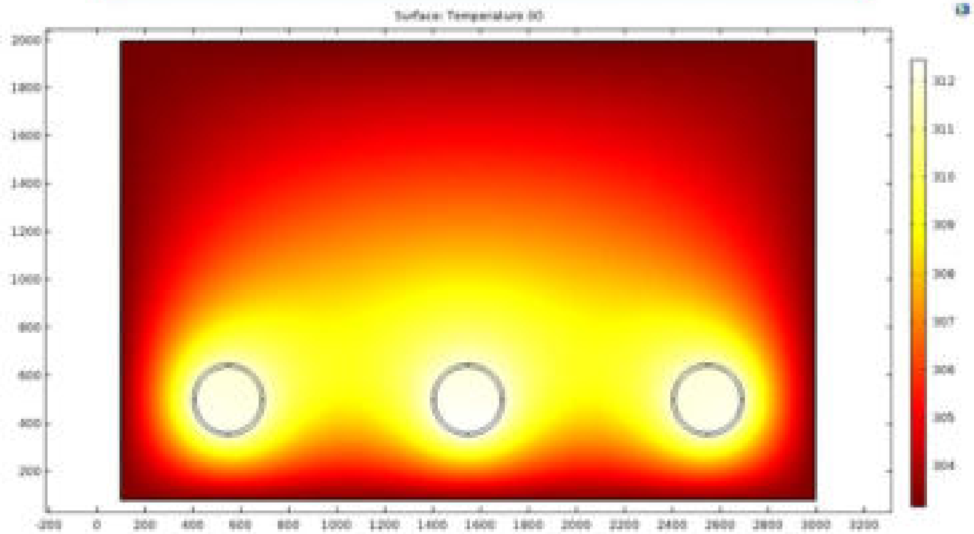
1 – szynoprzewody,
2 – osłona (górna pokrywa),
3 – zasilanie (wymuszalnik trójfazowy),
4 – cewki Rogowskiego,
5 – woltomierz cyfrowy,
6 – fazomierz cyfrowy,
7 – oscyloskop cyfrowy

Współpraca z przemysłem – Elektrobudowa S.A.

BZ:

- *Calculations of the temperature, power losses and the electromagnetic field of the generator busduct (*T. Szczegielniak, Z. Piątek, J. Zgraja, P. **Jabłoński**);
- *Obliczenia temperatury, strat mocy oraz pola elektromagnetycznego przyłącza do generatora* (Z. Piątek, T. Szczegielniak, D. Kusiak, P. **Jabłoński**);
- *Obliczenia temperatury oraz pola elektromagnetycznego przyłącza do generatora* (T. Szczegielniak, P. **Jabłoński**).





Politechnika Częstochowska

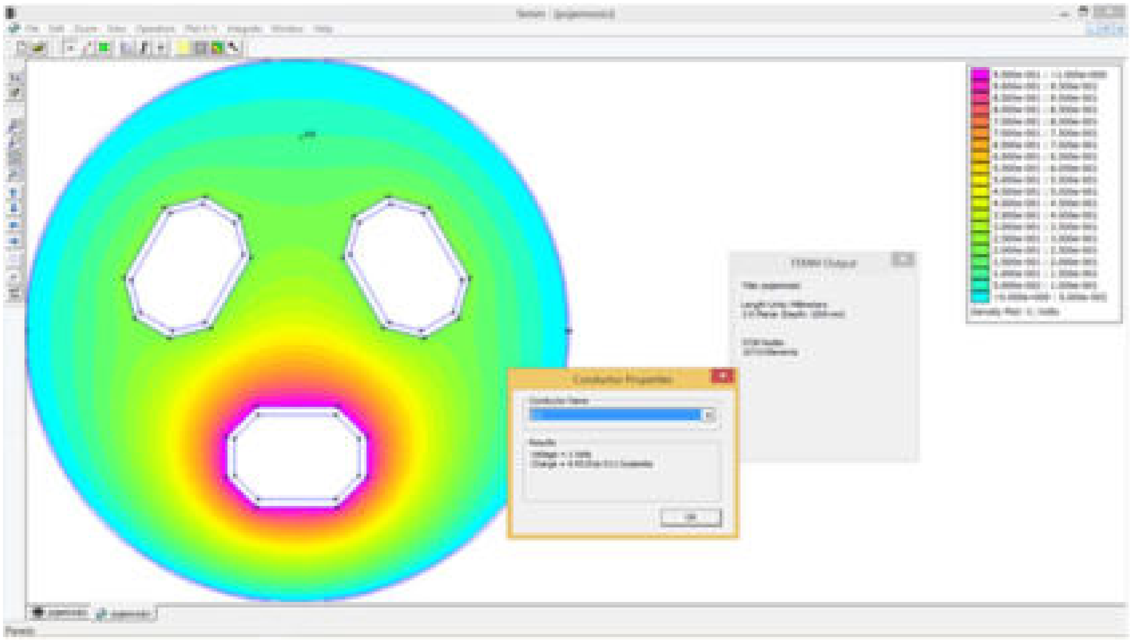
Wydział Elektryczny

Współpraca z przemysłem – Holduct

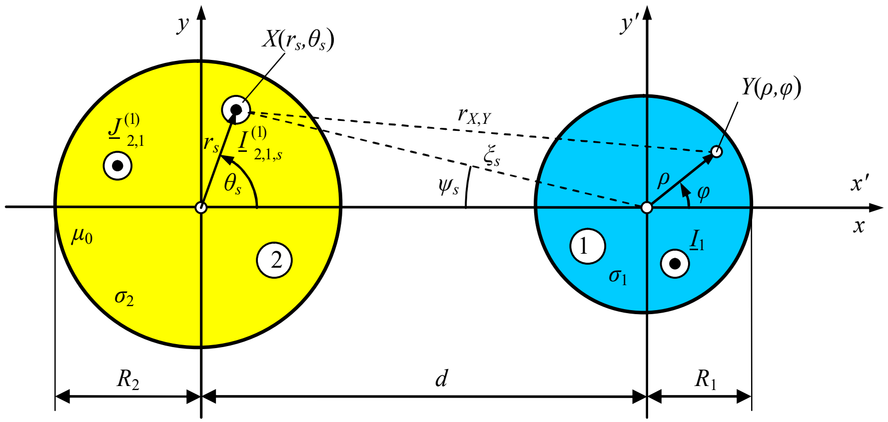
Projekt

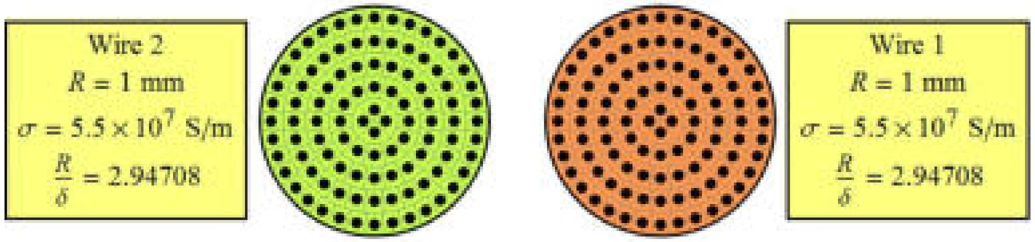
Szynoprzewód w izolacji stałej o własności kompensacji mocy biernej

(Z. Piątek, T. Szczegielniak, D. Kusiak, P. **Jabłoński**)



Gęstość prądu w dwóch przewodach





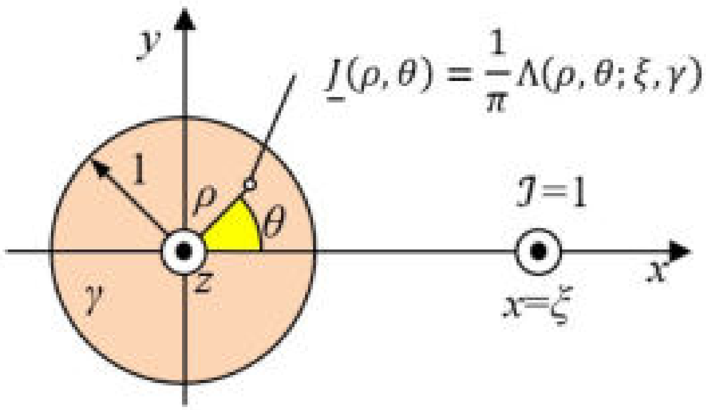
$$\Lambda\left(\frac{r}{R},\theta,\frac{R}{d},\underline{\Gamma}R\right) = -\underline{\Gamma}R\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{R}{d}\right)^{n}\frac{I_n\left(\underline{\Gamma}R\frac{r}{R}\right)}{I_{n-1}\left(\underline{\Gamma}R\right)}\cos n\theta$$

$$\underline{J}_{2,1}^{(1)}(r,\theta) = \frac{\underline{I}_1}{\pi R_2^2}\Lambda\left(\frac{r}{R_2},\theta,\frac{R_2}{d},\underline{\Gamma}_2 R_2\right)$$

$$\underline{J}_{1,2}^{(1)}(\rho,\varphi) = \frac{\underline{I}_2}{\pi R_1^2}\Lambda\left(\frac{\rho}{R_1},\pi-\varphi,\frac{R_1}{d},\underline{\Gamma}_1 R_1\right)$$

$$\underline{J}_{2,1}^{(m+1)}(r,\theta) = \frac{1}{\pi R_2^2}\sum_{v=1}^{V}\underline{I}_{1,2,v}^{(m)}\Lambda\left(\frac{r}{R_2},\theta-\psi_v,\frac{R_2}{\xi_v},\underline{\Gamma}_2 R_2\right)$$

$$\underline{J}_{1,2}^{(m+1)}(\rho,\varphi) = \frac{1}{\pi R_1^2}\sum_{s=1}^{S}\underline{I}_{2,1,s}^{(m)}\Lambda\left(\frac{\rho}{R_1},\pi-\varphi-\psi_s,\frac{R_1}{\xi_s},\underline{\Gamma}_1 R_1\right)$$



Układ wielu przewodów

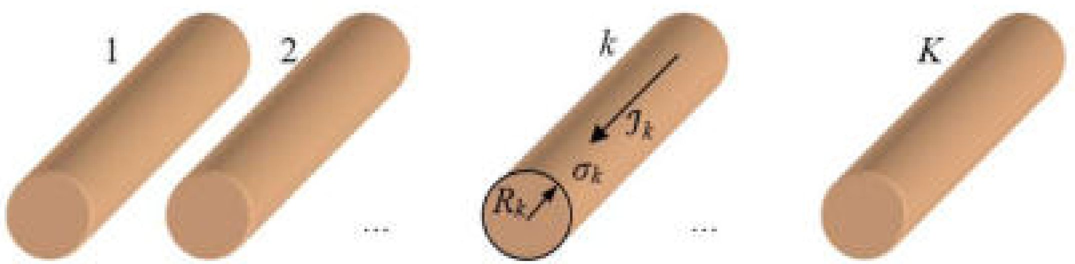
$$\underline{J}_i^{[M]} = \underline{\tilde{J}}_i + \Delta \underline{J}_i^{[M]}$$

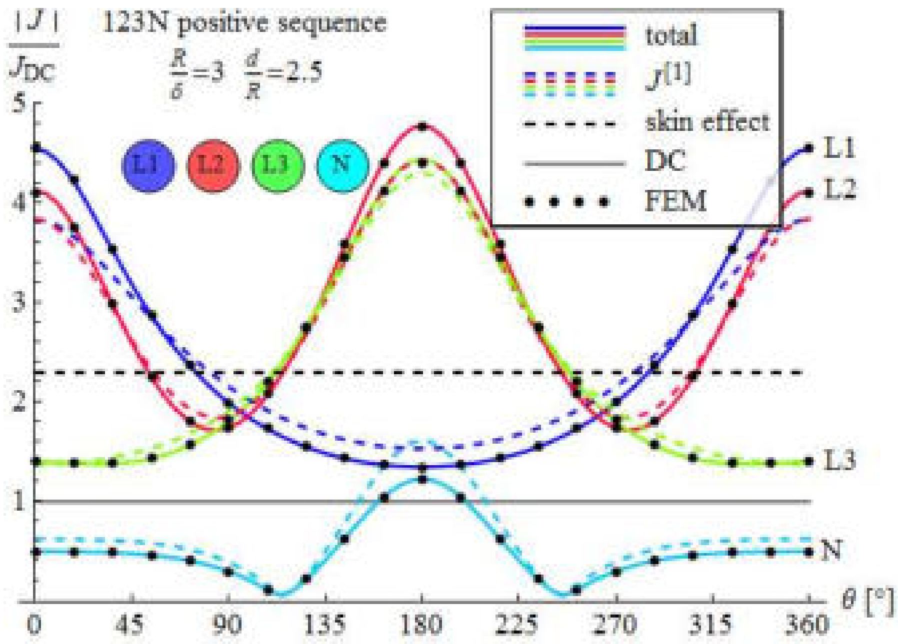
$$\underline{\tilde{J}}_i = \underline{\mathcal{J}}_i \frac{1}{\pi R_i^2}\frac{\Gamma_i R_i}{2}\frac{I_0(\Gamma_i r)}{I_1(\Gamma_i R_i)} + \underline{J}_i^{(1)}(r,\theta)$$

$$\underline{J}_i^{(1)}(r,\theta) = \sum_{k=1,k\neq i}^{K} \underline{\mathcal{J}}_k \frac{1}{\pi R_i^2}\Lambda\left(\frac{r}{R_i},\theta-\theta_k;\frac{r_k}{R_i},\Gamma_i R_i\right)$$

$$\Delta\underline{J}_i^{[M]}(r,\theta) = \frac{1}{\pi R_i^2}\sum_{j\neq i,q} \underline{J}_{j,q}^{[M]} S_{j,q}\Lambda\left(\frac{r}{R_i},\theta-\theta_{j,q};\frac{r_{j,q}}{R_i},\Gamma_i R_i\right)$$

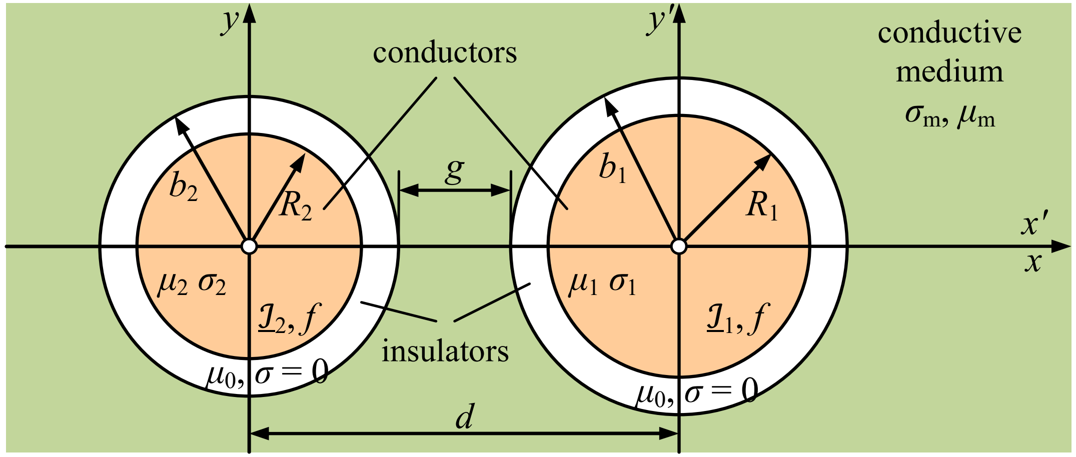
$$\Lambda(\rho,\varphi;\xi,\gamma) = -\gamma\sum_{n=1}^{\infty} \xi^{-n}\frac{I_n(\rho\gamma)}{I_{n-1}(\gamma)}\cos n\varphi$$





Przewody w środowisku przewodzącym

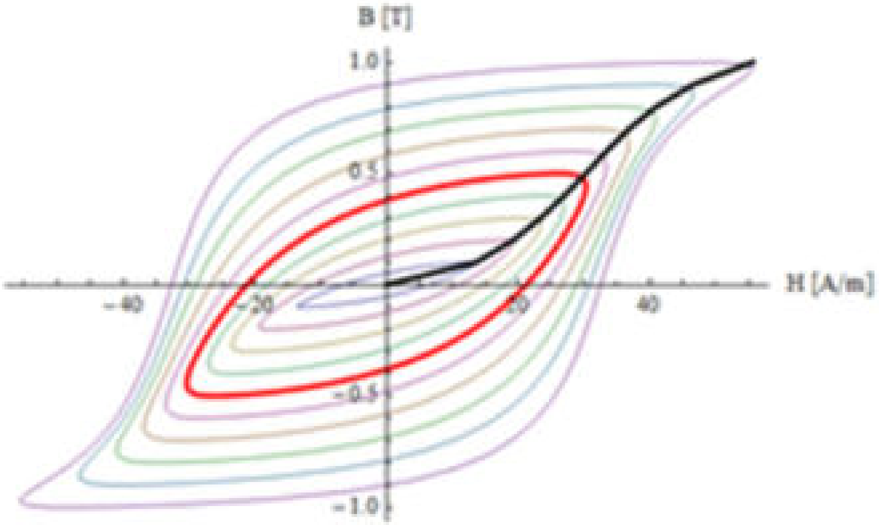
$$
\underline{J}_1^{tot}(\rho,\varphi) = \frac{\mathcal{I}_1}{\pi R_1^2}\mathcal{J}^s\left(\frac{\rho}{R_1};\frac{R_1}{\delta_1}\right) + \frac{\mathcal{I}_2}{\pi R_1^2}\mathcal{J}^p\left(\frac{\rho}{R_1},\pi-\varphi;\frac{R_1}{\delta_1},\frac{d}{\delta_\mathrm{m}},\frac{b_2}{d},\frac{b_1}{d},\frac{R_1}{b_1},\mu_{1\mathrm{r}},\mu_{\mathrm{mr}}\right)
$$



$$
\mathcal{J}^s\left(\frac{\rho}{R_1};\frac{R_1}{\delta_1}\right) = \frac{\Gamma_1 R_1}{2}\frac{I_0(\Gamma_1\rho)}{I_0'(\Gamma_1 R_1)}
$$

$$
\mathcal{J}^p\left(\frac{r}{R_2},\theta;\ldots\right) = \frac{\Gamma_2 R_2}{\Gamma_\mathrm{m} R_1 K_1(\Gamma_\mathrm{m} R_1)}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{K_n(\Gamma_\mathrm{m} d) I_n(\Gamma_2 r)}{\frac{\mu_{2\mathrm{r}}}{\mu_{\mathrm{mr}}}\frac{\Gamma_\mathrm{m} R_2}{\Gamma_2 R_2}K_n'(\Gamma_\mathrm{m} R_2) I_n(\Gamma_2 R_2) - I_n'(\Gamma_2 R_2) K_n(\Gamma_\mathrm{m} R_2)}\cos n\theta\,.
$$

Wpływ histerezy magnetycznej na straty wiroprądowe

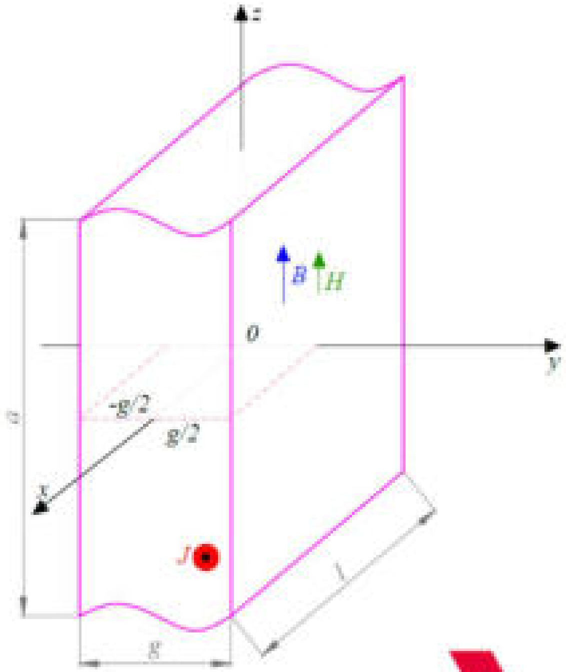


Założenia i model matematyczny

$$a \gg g,\, l \gg g,\, B_z(y,t),\, J_x(y,t) \qquad \boxed{B_z(H_z) = f_{H\to B}(H_z)}$$

$$\frac{\partial J_x(y,t)}{\partial y} = \sigma \frac{\partial B_z(y,t)}{\partial t} \qquad \frac{\partial H_z(y,t)}{\partial y} = J_x(y,t)$$

$$B_{sr}(t) = \frac{\phi(t)}{gl} = B_m \sin \omega t \qquad P_{wir} = \frac{4f}{\sigma g} \int_{t=0}^{\frac{1}{2f}} \int_{0}^{\frac{1}{2}g} J_x^2(y,t)\,dy\,dt.$$



Podejście klasyczne

$$P_{kl} = \frac{\pi f B_m^2}{2\rho\mu} \gamma \frac{\sinh\gamma - \sin\gamma}{\cosh\gamma - \cos\gamma} \qquad \gamma = \frac{g}{\delta} \qquad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

Algorytm

START

$$\dot{B}_z^{(k-1)}(y,t)=\frac{\partial B_z^{(k-1)}(y,t)}{\partial t}$$

gdzie : $\dot{B}_z^{(0)}(y,t)=\dot{B}_{sr}^{(0)}(t)$

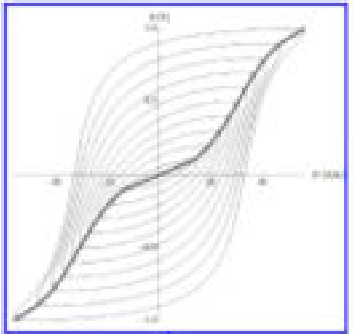
$$J_x^{(k)}(y,t)-J_x^{(k)}(0,t)=\sigma\int_0^y \dot{B}_z^{(k-1)}(y,t)\,\mathrm{d}y$$

gdzie $J_x^{(k)}(0,t)=0$, oraz

$$J_x^{(k)}(y,t)=\sigma\int_0^y \dot{B}_z^{(k-1)}(y,t)\,\mathrm{d}y$$

$$H_z^{(k)}(y,t)=\widetilde{H}_z^{(k)}(y,t)+H_z^{(k)}(0,t)$$

gdzie $\widetilde{H}_z^{(k)}(y,t)=\int_0^y J_x^{(k)}(y,t)\,\mathrm{d}y,$



$$\widetilde{B}_z^{(k)}(y,t)=f_{\mathrm{HB}}[H_z^{(k)}(y,t)]$$

$$\widetilde{B}_{sr}^{(k)}(y,t)=\frac{2}{g}\int_0^{g/2}\widetilde{B}_z^{(k)}(y,t)\,dy$$

$$B_z^{(k)}(y,t)=\widetilde{B}_z^{(k)}(y,t)-\widetilde{B}_{sr}^{(k)}(t)+B_{sr}(t)$$

$$\Delta B^{(k)}(y,t)=B_z^{(k)}(y,t)-B_z^{(k-1)}(y,t)$$

$$e=\frac{\max\left|\Delta B^{(k)}(y,t)\right|}{B_m}\le\varepsilon$$

nie

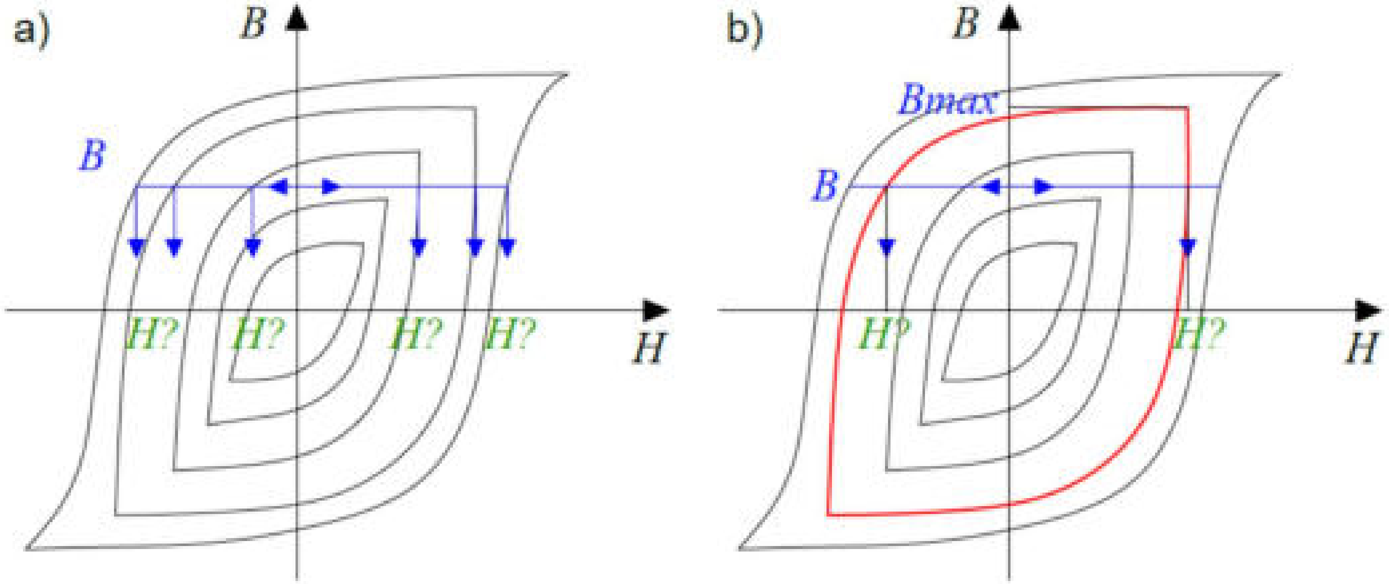
n<N

nie

tak

$$P_{Ji\,alg}=\frac{4f}{\sigma g}\int_{t=0}^{\frac{1}{2f}}\int_{y=0}^{\frac{1}{2}g}J_x^2(y,t)\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}t$$

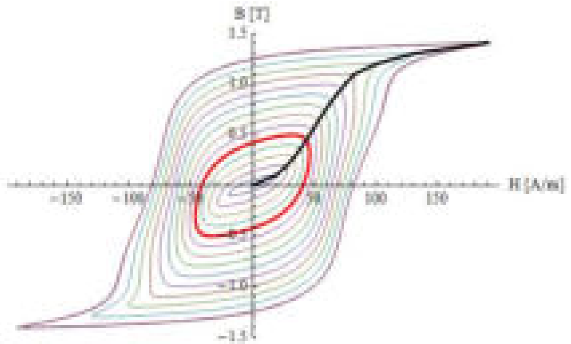
Konwersja między B i H



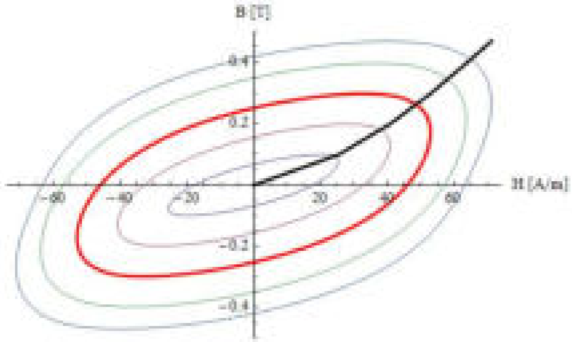
Przykładowe wyniki – M330 50A

Blacha M330-50A 3% Si-Fe
o grubości g = 0,48 mm i konduktywności
elektrycznej σ = 2,56 MS/m

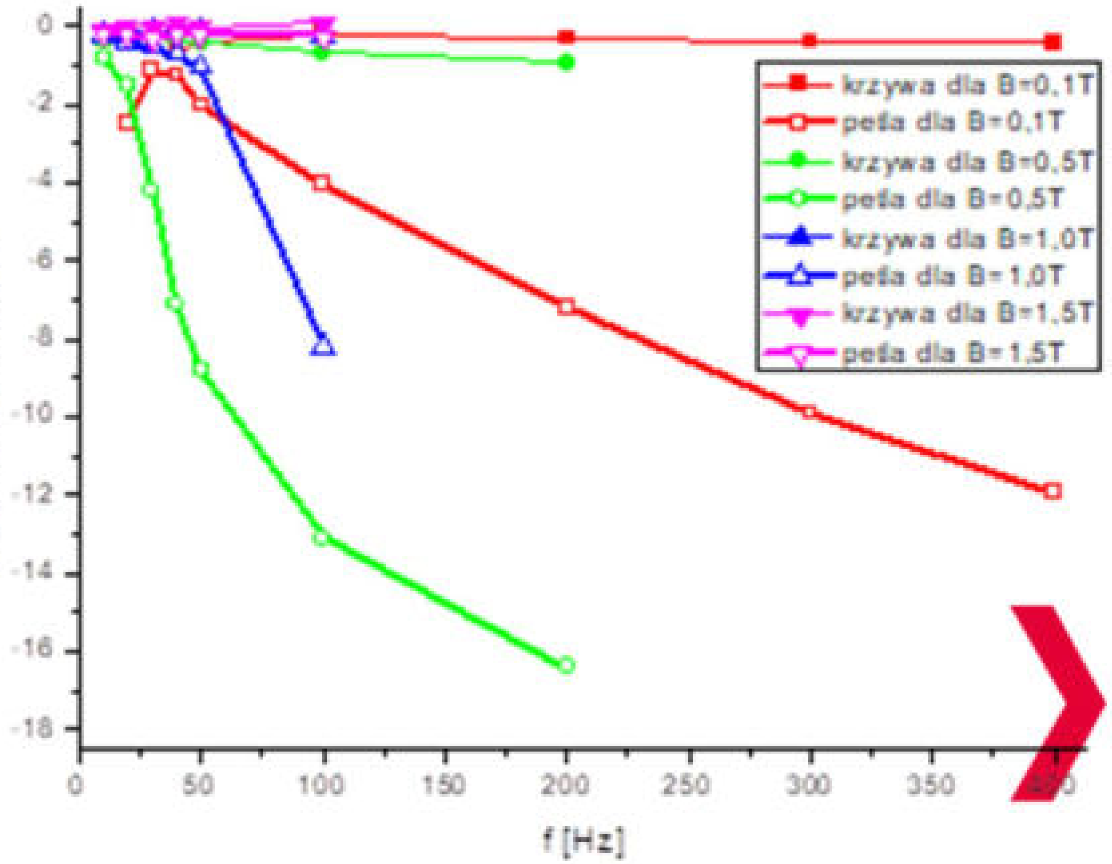
100 Hz



300 Hz



$$\delta_P = \frac{P_{wir} - P_{kl}}{P_{kl}} \times 100\%$$



Ogrzewanie rozjazdów kolejowych metodą indukcyjną

Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny

Geneza problemu

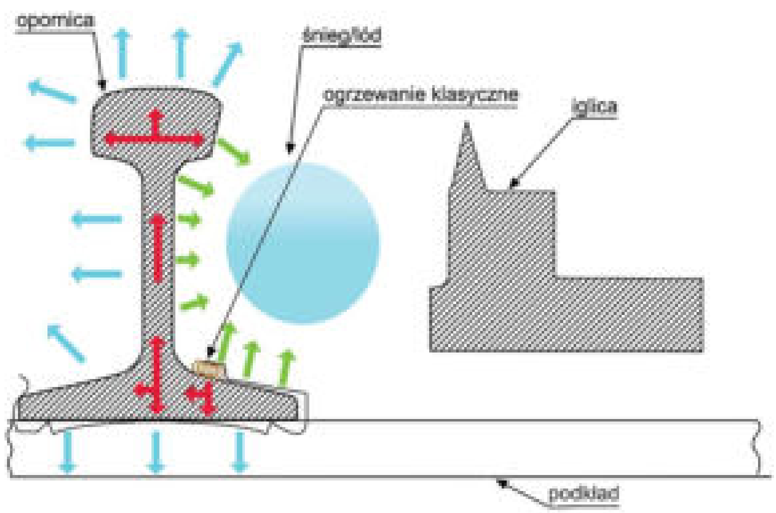
- Wcześniejsze prace wskazywały na to, że możliwa jest poprawa efektywności ogrzewania rozjazdów w zimie po zmianie dystrybucji ciepła
- Powstało urządzenie indukcyjne do ogrzewania rozjazdów kolejowych
- Badane urządzenie wykazywało mniejsze zużycie energii do osiągnięcia tego samego celu co klasyczne ogrzewanie rezystancyjne

Politechnika Częstochowska

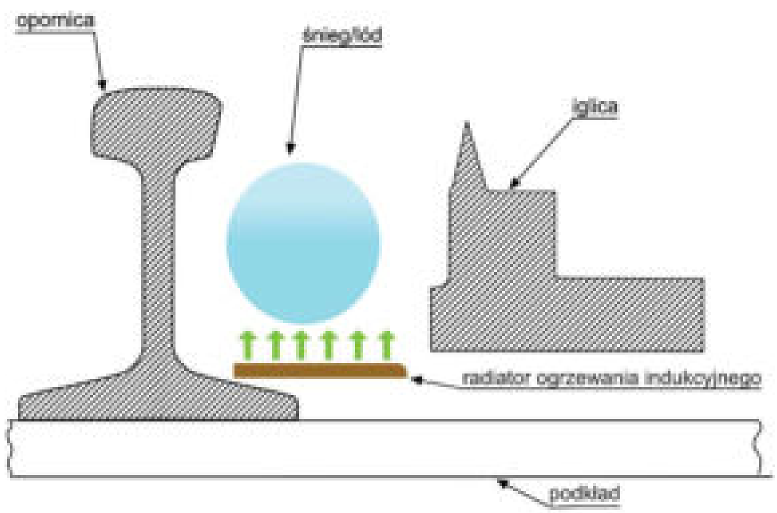
Wydział Elektryczny

Porównanie dystrybucji ciepła

Tradycyjny grzejnik rezystancyjny mocowany do stopki szyny (EOR)

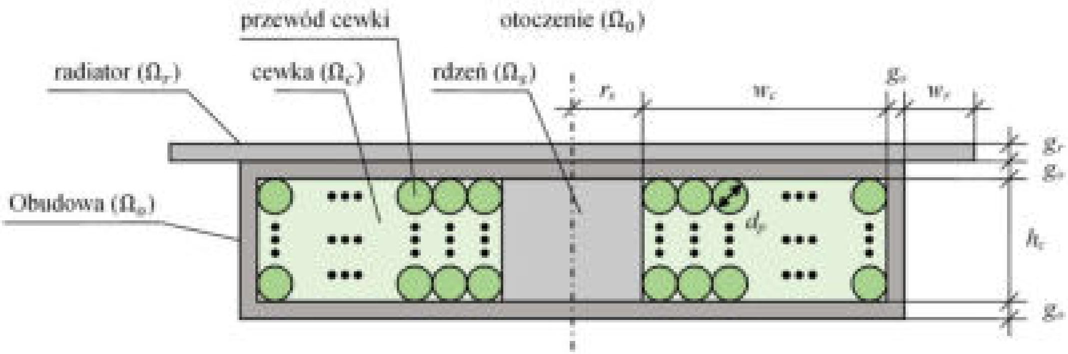


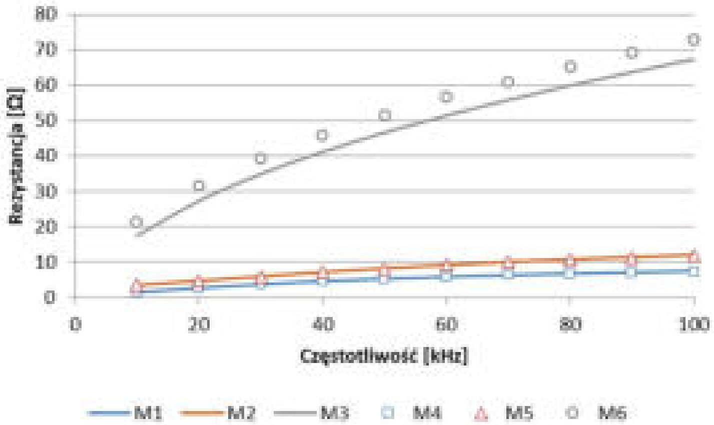
Proponowany grzejnik indukcyjny w obszarze roboczym rozjazdu (IOR)

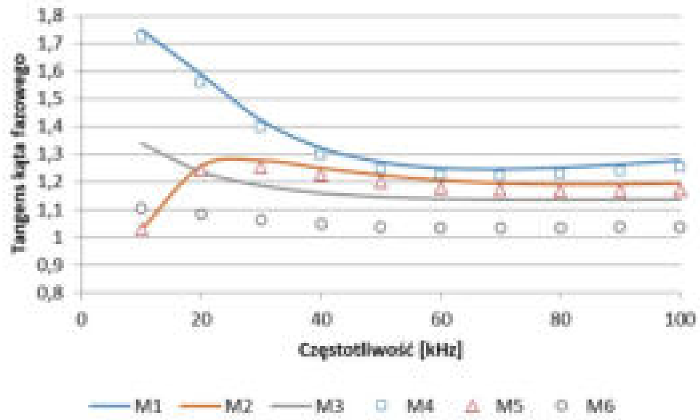


Badania symulacyjne

Badano wpływ parametrów konstrukcyjnych grzejnika oraz wymuszeniowych na wielkości obwodowe



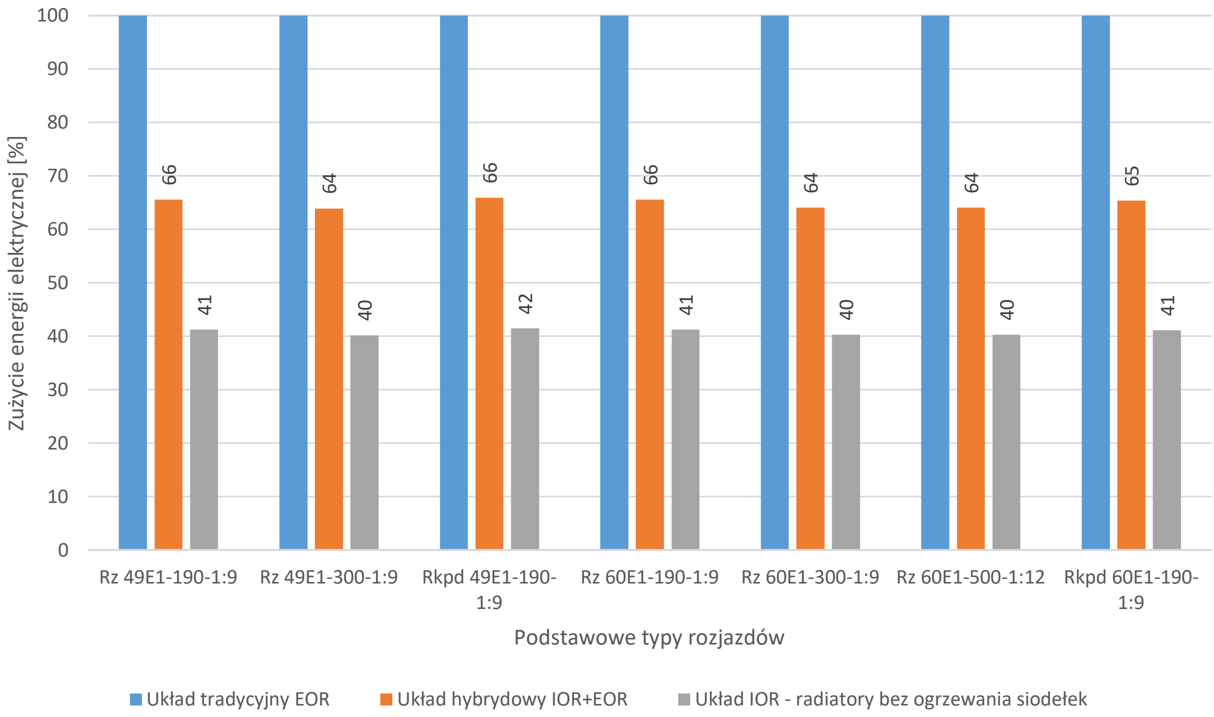




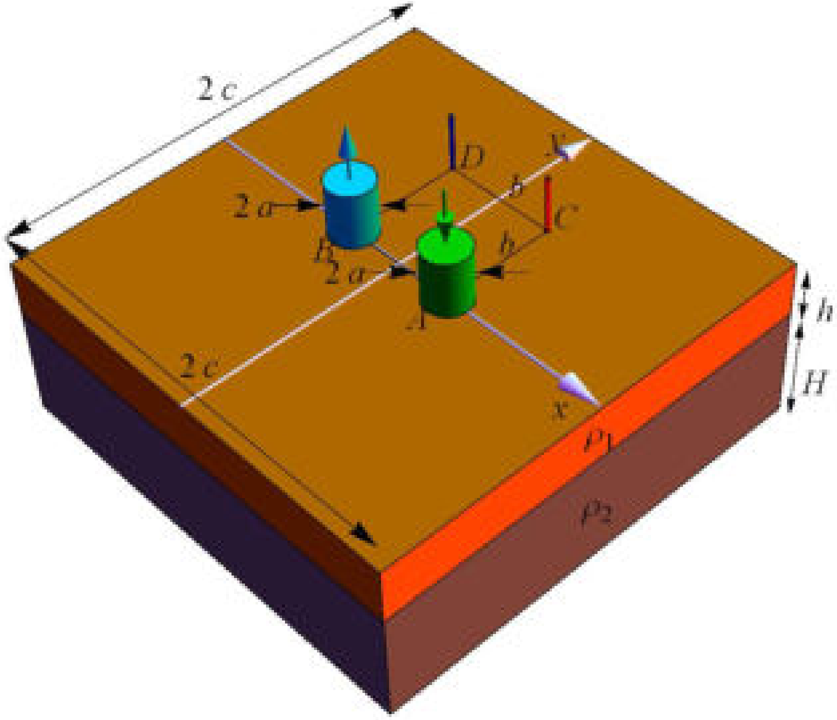
M1-M6 – różne konfiguracje materiałowe

Zużycie energii w ujęciu procentowym

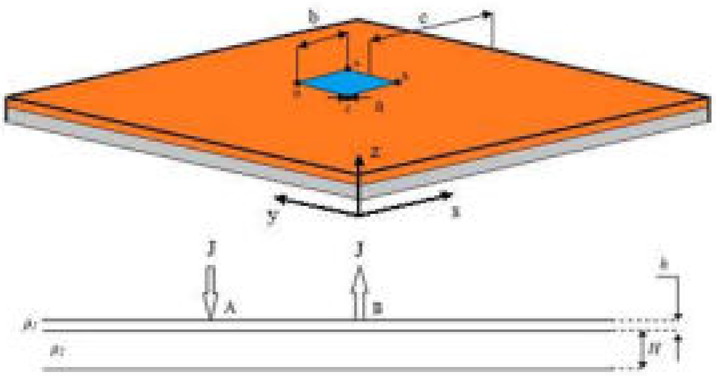
- Możliwość zmniejszenia energochłonności ogrzewania rozjazdów
- Możliwość sterowania intensywnością nagrzewania za pomocą programowej zmiany częstotliwości

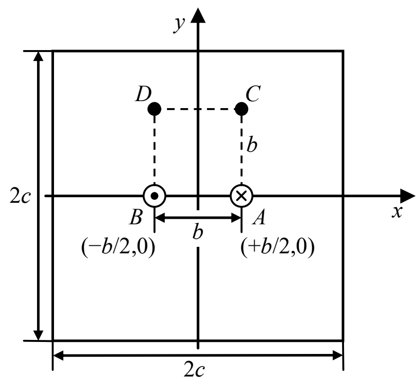


Wykorzystanie analizy polowej w badaniach nieniszczących

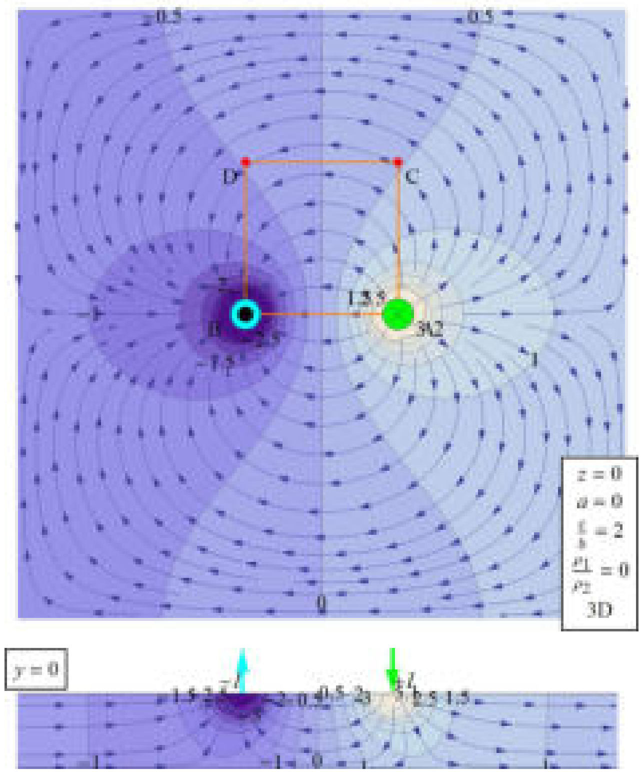


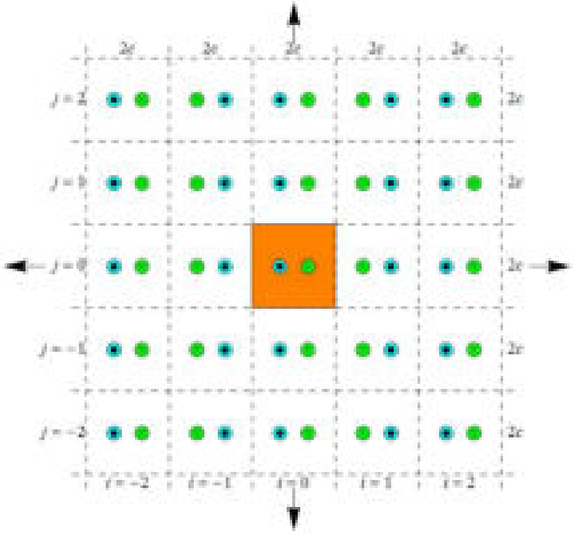
Badania nad metodą czteroelektrodową określania rezystancji powłok antystatycznych





$$R_{AB,CD} = \frac{U_{CD}}{I_{AB}}$$





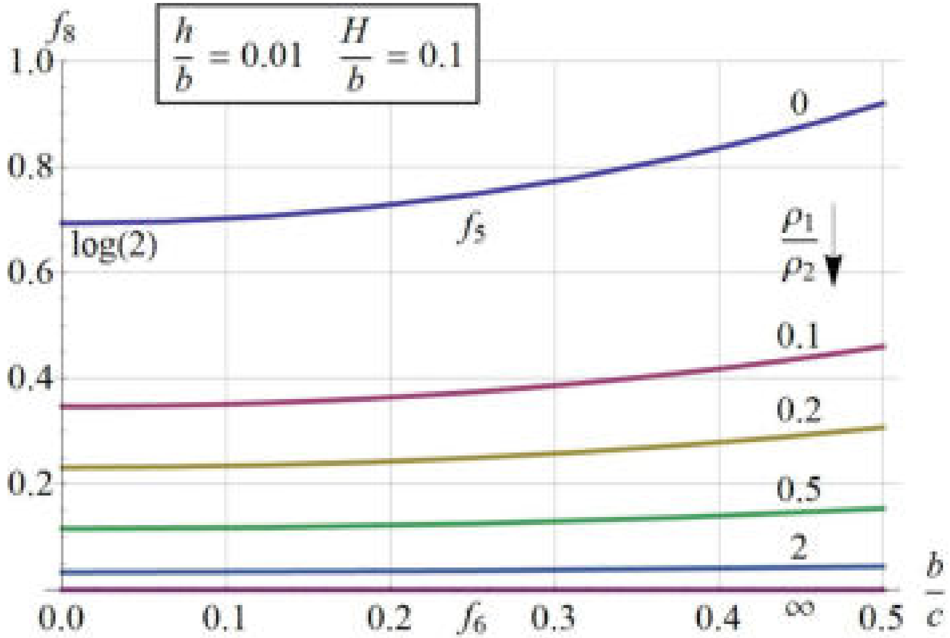
Wpływ parametrów wymiarowych i materiałowych na $R_{AB,CD}$

$$\frac{r_{ij}}{c} = \sqrt{(2i)^2 + \left(\frac{b}{c} - 2j\right)^2}$$

$$\frac{r'_{ij}}{c} = \sqrt{\left(\frac{b}{c} - 2i\right)^2 + \left(\frac{b}{c} - 2j\right)^2}$$

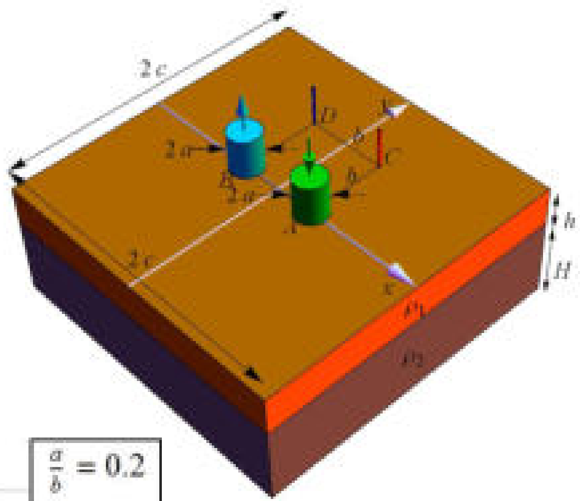
$$G(\xi, \eta, \rho) = \frac{1 - \rho \tanh \xi\eta}{\tanh \xi + \rho \tanh \xi\eta} \frac{\exp(-\xi)}{\cosh \xi}$$

$$R_{AB,CD} = \frac{\rho_1}{2\pi h} f_8\left(\frac{h}{b}, \frac{b}{c}, \frac{\rho_1}{\rho_2}, \frac{H}{b}\right)$$



$$f_8\left(\frac{h}{b}, \frac{b}{c}, \frac{\rho_1}{\rho_2}, \frac{H}{b}\right) = 2\frac{h}{b}\frac{b}{c} \sum_{j=-\infty}^{\infty} (-1)^j \left\{\left(\frac{c}{r_{ij}} - \frac{c}{r'_{ij}}\right) + \int_0^\infty G\left(\frac{h}{b}\frac{b}{c}\tau, \frac{H}{b}\frac{b}{h}, \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\left[J_0\left(\tau\frac{r_{ij}}{c}\right) - J_0\left(\tau\frac{r'_{ij}}{c}\right)\right] d\tau\right\}$$

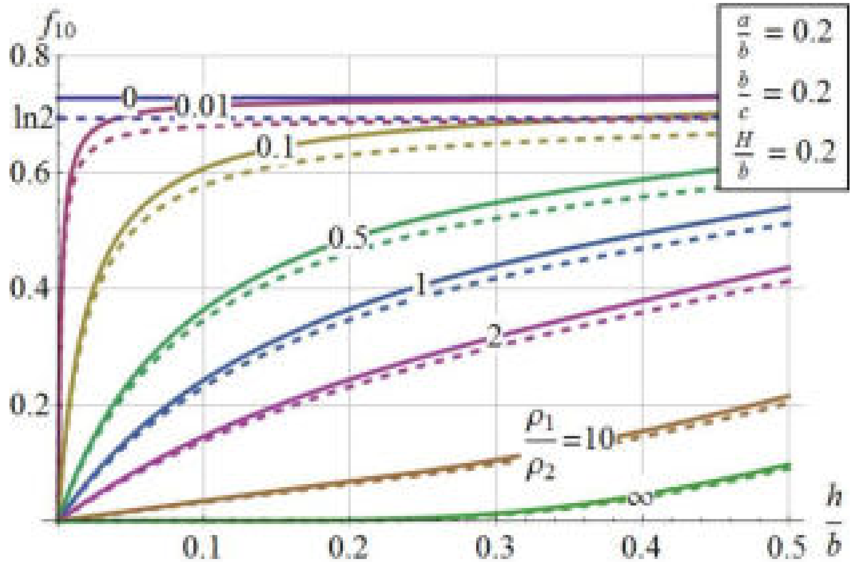
Wpływ wielkości elektrod



$$R_{AB,CD} = \frac{\rho_1}{2\pi h} f_{10}\left(\frac{a}{c},\frac{b}{c},\frac{h}{c},\frac{H}{c},\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)$$

$$A_{ij} = \frac{1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\tanh\left(\nu'_{ij}\frac{h}{c}\right)\tanh\left(\nu'_{ij}\frac{H}{c}\right)}{\tanh\left(\nu'_{ij}\frac{h}{c}\right) + \frac{\rho_1}{\rho_2}\tanh\left(\nu'_{ij}\frac{H}{c}\right)}$$

$$C_{ij} = \frac{8\pi}{1+\delta_{j0}}\frac{1}{{\nu'_{ij}}^2}\frac{h}{c}\sin\left(\frac{\lambda'_i}{2}\frac{b}{c}\right)\frac{c}{a}J_1\left(\nu'_{ij}\frac{a}{c}\right)$$



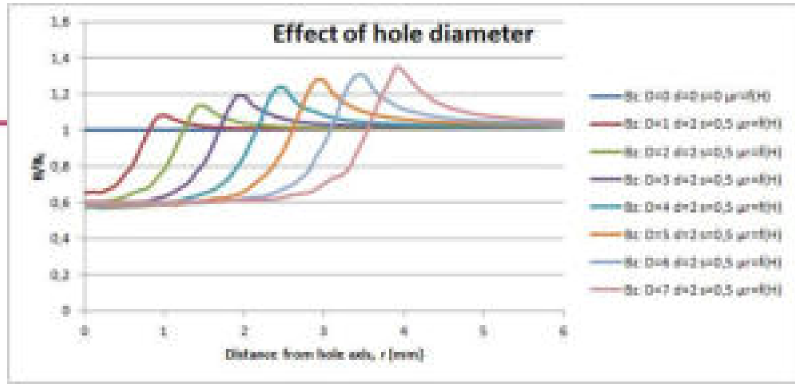
Linie przerywane są dla $a = 0$ i $c \to \infty$

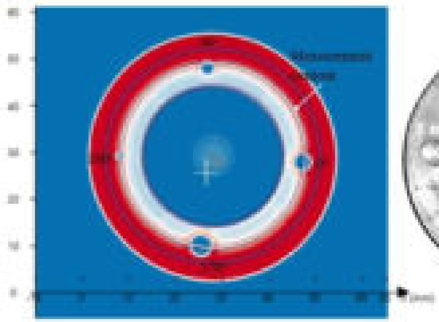
$$f_{10}\left(\frac{a}{c},\frac{b}{c},\frac{h}{c},\frac{H}{c},\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) = 2\sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij}\left(\frac{a}{c},\frac{b}{c},\frac{h}{c}\right)A_{ij}\left(\frac{h}{c},\frac{H}{c},\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\sin\left(\frac{\lambda'_i}{2}\frac{b}{c}\right)\cos\left(\mu'_j\frac{b}{c}\right)$$

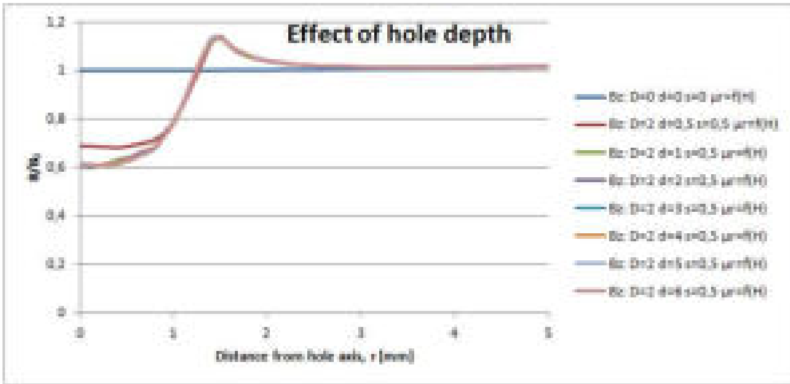
Politechnika Częstochowska

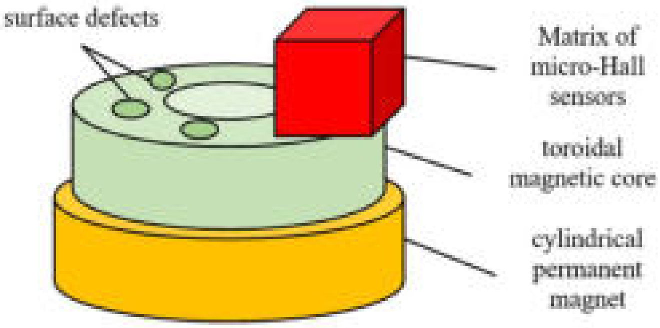
Wydział Elektryczny

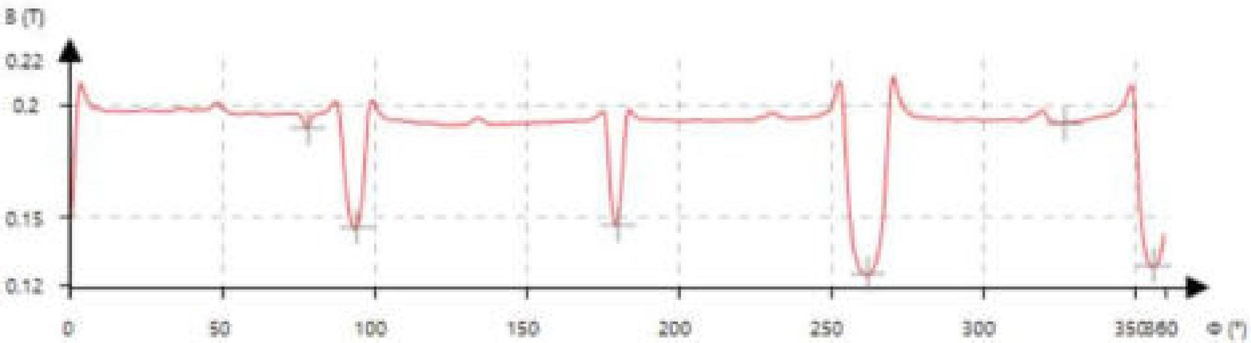
Identyfikacja defektów w magnetykach



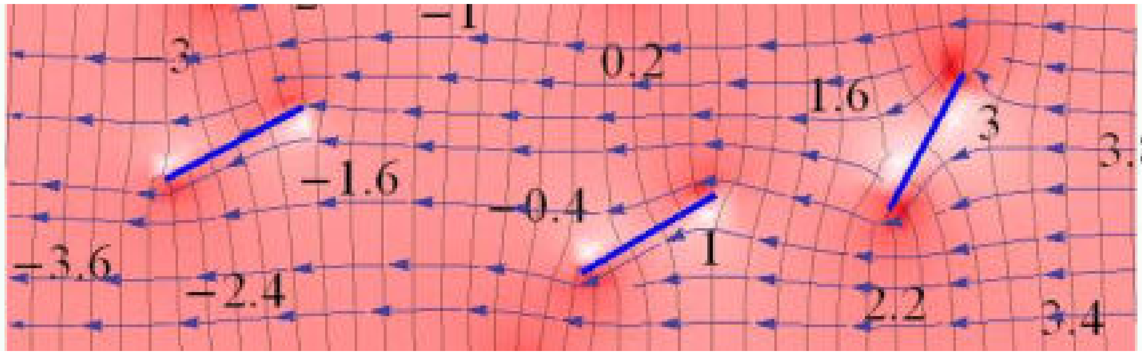








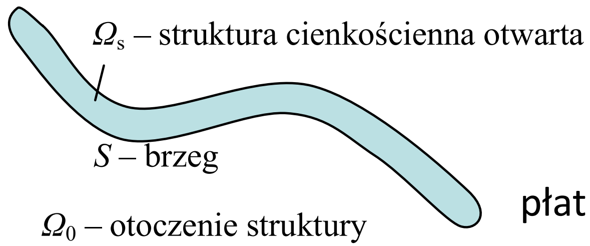
Metoda elementów brzegowych w analizie pola EM wokół struktur cienkościennych



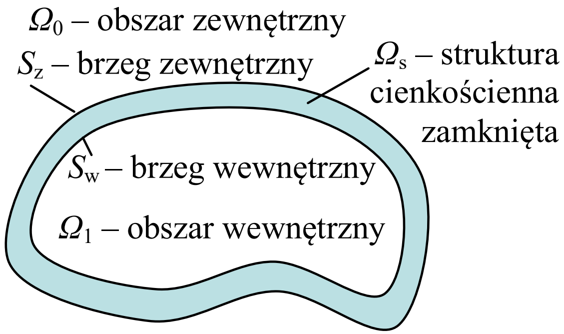
MEB – struktury cienkościenne

Przez strukturę cienkościenną rozumie się obiekt, którego jeden z wymiarów, zwany grubością, jest nieporównywalnie mniejszy od pozostałych.

- Pęknięcia, nieciągłości i inne defekty materiałowe w ciele stałym,
- Powierzchnie zabrudzone lub pokryte cienkimi powłokami (np. izolatory zabrudzone powierzchniowo),
- Membrany, folie,
- Niektóre osłony, ekrany.



płat



powłoka

Problemy w analizie struktur cienkościennych

Problemy

- Klasyczne metody (MRS, MES, MEB) wymagają przeważnie zastosowania bardzo drobnej dyskretyzacji samej struktury i ewentualnie jej otoczenia (wzrost nakładu obliczeniowego),
- W przypadku bardzo cienkich struktur może nastąpić załamanie obliczeń z powodu błędów numerycznych.

Problemy w MEB

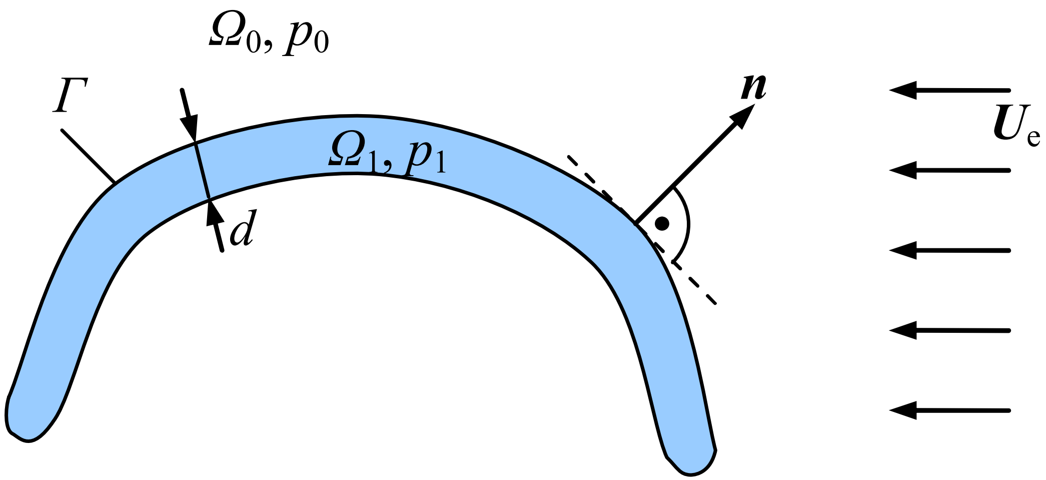
Główny problem:

- Występowanie całek prawie-osobliwych.

Środki zaradcze:

- Zastosowanie wyrafinowanych metod numerycznych obliczania takich całek,
- Eliminacja całek prawie osobliwych poprzez zastępcze potraktowanie struktury cienkowarstwowej.

Zagadnienie modelowe dla płata



Przykłady rzeczywistych pól:
- elektrostatyczne,
- przepływowe,
- magnetostatyczne,
- termostatyczne.

$$\Omega_0 : \qquad \nabla^2 u^{(0)} = -f^{(0)}$$

$$\Omega_1 : \qquad \nabla^2 u^{(1)} = 0$$

Na brzegu Γ:

$$u^{(0)} = u^{(1)}$$

$$\frac{\partial u^{(0)}}{\partial n} = \alpha \frac{\partial u^{(1)}}{\partial n} + h$$

$$\alpha = \frac{p_1}{p_0}$$

$$h = (1-\alpha)\hat{\boldsymbol{n}} \cdot \boldsymbol{U}_\mathrm{e}$$

Politechnika Częstochowska
Wydział Elektryczny

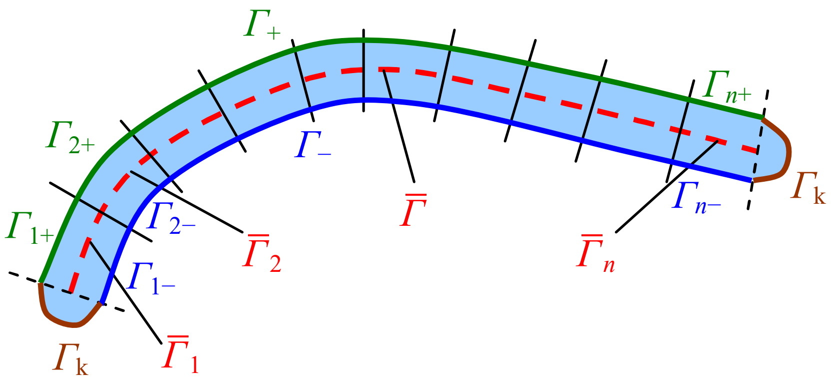
Tabela 1.1. Wybrane pola fizyczne opisywane modelowym polem statycznym

Pole	Funkcja pola u	Parametr materiałowy p	Pole wymuszające $\boldsymbol{U}_e$	Funkcja u_e	Funkcja h
Elektro-statyczne	Całkowity potencjał elektryczny V	Przenikalność elektryczna względna ε_r	Natężenie pola elektrycznego $\boldsymbol{E}_e$	Potencjał skalarny V_e pola $\boldsymbol{E}_e$	0
Przepły-wowe	Całkowity potencjał elektryczny V	Konduktywność elektryczna γ	Natężenie pola elektrycznego $\boldsymbol{E}_e$	Potencjał skalarny V_e pola $\boldsymbol{E}_e$	0
Magneto-statyczne	Zredukowany skalarny potencjał magnetyczny ψ	Przenikalność magnetyczna względna μ_r	Natężenie pola magnetycznego $\boldsymbol{H}_e$	0	$(1-\alpha)\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{H}_e$
Magneto-statyczne $\boldsymbol{J}=0$	Całkowity skalarny potencjał magnetyczny φ	Przenikalność magnetyczna względna μ_r	Natężenie pola magnetycznego $\boldsymbol{H}_e$	Potencjał skalarny φ_e pola $\boldsymbol{H}_e$	0
Płasko-równoległe magneto-statyczne	Składowa z-owa wektorowego potencjału mag-netycznego A_z	Reluktywność magnetyczna względna $1/\mu_r$	Indukcja pola magnetycznego $\boldsymbol{B}_e$	Składowa z-owa A_{ez} wektorowego potencjału magnetycz-nego pola $\boldsymbol{B}_e$	0
Termo-statyczne	Ustalona temperatura całkowita T	Współczynnik przewodności cieplnej λ	$-\nabla T_e$	Temperatura wymuszona T_e	0

Model zredukowany i klasyczny

Klasyczny model MEB (MEBK)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}-\mathbf{H} & \mathbf{G}\alpha \\ \mathbf{H} & -\mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}^{(1)} \\ \mathbf{Q}^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{\mathrm{e}} - \mathbf{Gh} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}$$



Model MEB dla płata (MEBP)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & (\alpha-1)\hat{\mathbf{H}}_{\overline{\Gamma}\Gamma} \\ \mathbf{0} & \alpha\mathbf{I} + (\alpha-1)d\mathbf{P} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{\mathbf{U}} \\ \varDelta\mathbf{U} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{\mathrm{e}} \\ \varDelta\mathbf{U}_{\mathrm{e}} \end{Bmatrix}$$

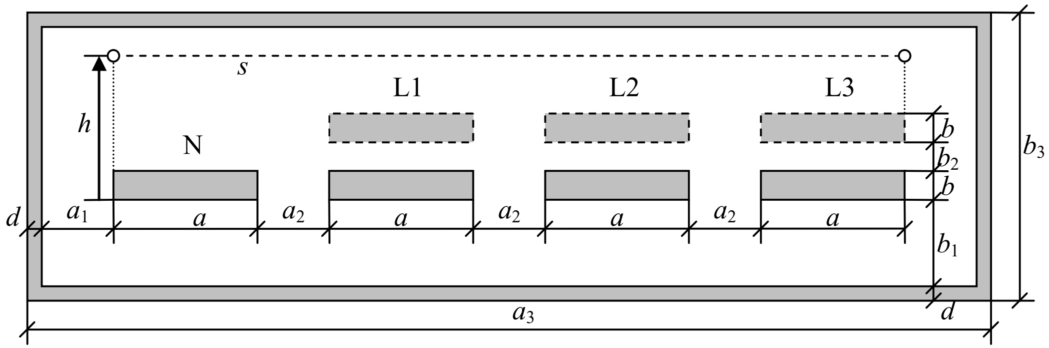
Zalety:
- Ponad dwa razy mniej niewiadomych,
- Brak całek prawie osobliwych.

Wady:
- Nie działa dla „zbyt dużych” α.

Politechnika Częstochowska

Wydział Elektryczny

Osłona toru prądowego jako powłoka



a = 60 mm

a_1 = 32 mm

a_2 = 30 mm

a_3 = 400 mm

$b = b_2$ = 5 mm

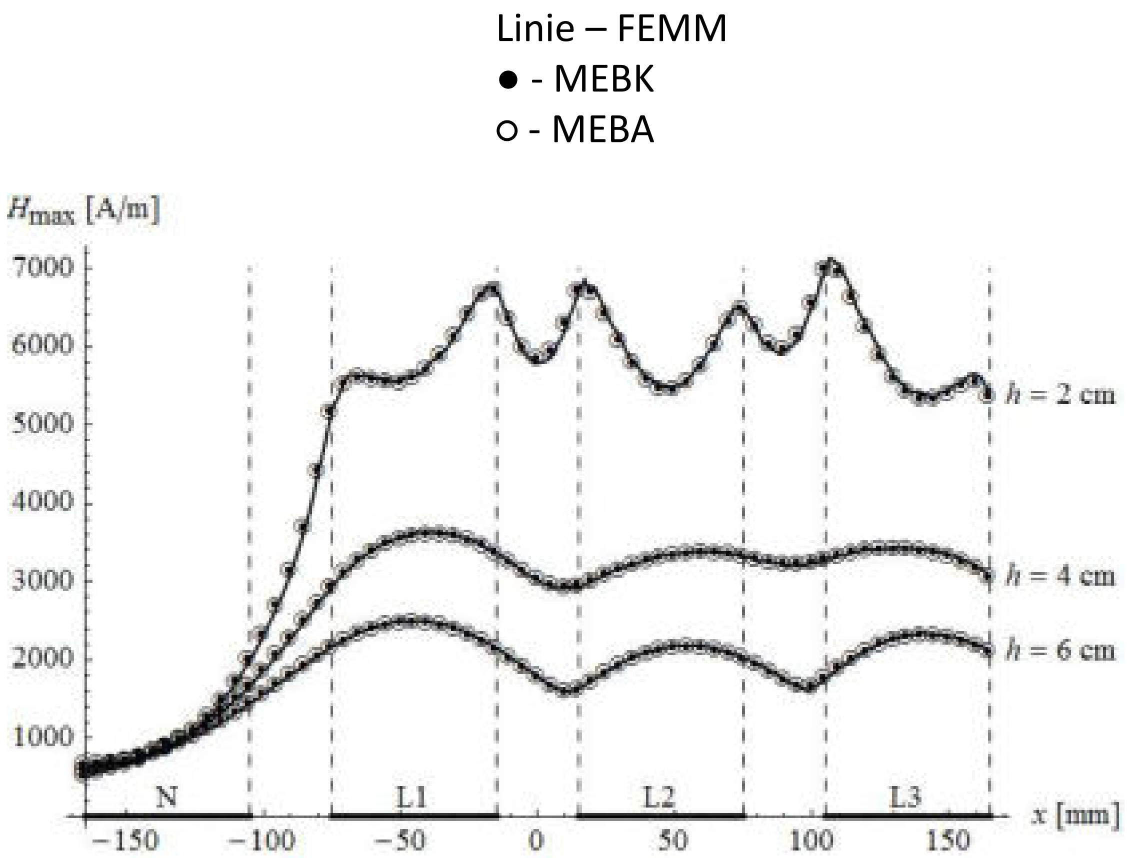
b_1 = 45 mm

b_3 = 132 mm

d = 3 mm

f = 50 Hz

I = 1 kA



POLI
TECH
NIKA
Politechnika
Częstochowska

Wydział
Elektryczny