

Jacek SKOWRON

## WPLYW TEMPERATURY NA CHARAKTERYSTYKĘ KOLEJOWEGO HAMULCA WIROPRAĐOWEGO

**Streszczenie.** W artykule podano równania na składową poziomą siły ponderomotorycznej działającej na szynę kolejową podczas pracy hamulca wiroprowadowego. Analiza opiera się na rozwiązaniu równań opisujących rozkład magnetycznego potencjału wektorowego w szczelinie powietrznej (pomiędzy płozą hamulca a szyną kolejową) i w szynie kolejowej. Rozpatrywany jest model hamulca, w którym prąd wirowy płynie w warstwie wierzchniej szyny o temperaturze punktu Curie. Uzyskane rozwiązanie pozwala na uwzględnienie wpływu temperatury na charakterystykę hamulca wiroprowadowego.

## THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON RAIL EDDY CURRENT BRAKE CHARACTERISTICS

**Summary.** In the article equations describing the vertical component of ponderomotive force acting on railway rail during eddy-current brake operation have been presented. The analysis has been based on the solution of equations describing the distribution of vector magnetic potential in the air-gap (between the car stop and rail) and the rail. A brake model in which eddy-current flows in the surface layer of a rail of a finite thickness defined by eddy-current penetration depth into the rail has been analysed. The solution makes it possible to allow for the skin effect and the influence of higher harmonics on the brake characteristics

### 1. WSTĘP

Kolejowe hamulce wiroprowadowe stają się ponownie obiektem zainteresowania zachodnich ośrodków doświadczalnych, prowadzących badania nad hamulcami dla super szybkich pociągów. Hamulec ten ma szereg korzystnych cech, takich jak: niezależność od przyczepności, brak zużywania się płozy, oddawanie energii do szyn w czasie hamowania, cicha praca hamulca i możliwość wykorzystywania go do hamowania służbowego. Zasadniczą wadą tego hamulca jest konieczność stosowania stosunkowo dużych mocy i łączące się z tym nagrzewanie się uzwojeń wzbudzenia hamulca. Mimo tych wad jest on jedynym dodatkowym hamulcem, który może zapewnić skuteczne hamowanie przy bardzo dużych prędkościach jazdy.

Badania hamulca wiropądowego firmy Knorr, prowadzone w połowie lat osiemdziesiątych przez DB [1], wykazały dużą rozbieżność pomiędzy oczekiwaną charakterystyką hamulca a wynikami eksperymentu. Hamulec został zaprojektowany na podstawie wyników badań eksperymentalnych, prowadzonych na stanowisku doświadczalnym wykonanym w skali 1:1. Stanowisko to nie dawało możliwości badania wpływu temperatury na charakterystykę hamulca (cała energia hamowania wydzielala się w tarczy). Projektując hamulec kolejowy przyjęto zbyt małą podziałkę biegunową, co spowodowało niekorzystne przesunięcie charakterystyki hamulca. Moc rozwijana przez hamulec, przy prędkościach powyżej 300 km/h wynosi około 600 KW i cała ta moc tracona jest w wierzchniej warstwie szyny (w której płynie prąd wirowy), o grubości zależnej od podziałki biegunowej. Pociąg składający się z dziesięciu wagonów ma szeregowo umieszczone nad jedną szyną dwadzieścia hamulców, co daje moc traconą w szynie rzędu 12 MW. Tak duża energia wydzielająca się na powierzchni szyny może podnosić jej temperaturę do punktu Curie (dla stali  $t_c \sim 720^\circ\text{C}$ ) zmieniając jej własności magnetyczne. Występuje wtedy zjawisko wzrostu grubości warstwy, w której płynie prąd wirowy do momentu uzyskania równowagi na granicy punktu Curie. Proces ten jest skomplikowany z uwagi na występujące zjawisko przewodnictwa cieplnego, które powinno się uwzględnić, co czyni problem bardzo złożonym. Dlatego w omawianym modelu hamulca wiropądowego wstępnie założono, że proces nagrzewania się warstwy wierzchniej odbywa się bez wymiany ciepła z otoczeniem. Takie założenie ma pewne uzasadnienie w tym, że czas przejazdu pociągu przez odcinek równy jego długości wynosi około 3 s, przy prędkości 300 km/h.

W poniższej pracy przedstawiono model matematyczny hamulca, w którym przyjęto, że prąd wirowy płynie w warstwie wierzchniej szyny, o skończonej grubości  $\Delta$ , składającej się z dwóch warstw: pierwszej, w której temperatura przekroczyła punkt Curie, i drugiej, która nie utraciła własności magnetycznych. Przyjęto, że w pierwszej fazie hamowania posługujemy się modelem dwuwarstwowym, a po obniżeniu się prędkości, gdy temperatura warstwy wierzchniej szyny spadnie poniżej punktu Curie, modelem jednowarstwowym. Opracowany model pozwala uwzględnić wpływ temperatury na charakterystykę trakcyjną hamulca wiropądowego. Prawidłowo zaprojektowany hamulec powinien zapewniać bezpieczny zakres temperatur powierzchni szyny, który nie powodowałby zmian własności materiału szyny.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY

Oznaczenia użyte w artykule:  $A$  - magnetyczny potencjał wektorowy,  $A^*$  - wektor sprzężony,  $F_x$  - siła hamująca,  $t$  - czas,  $v$  - prędkość,  $\gamma$  - przewodność elektryczna,  $\Delta$  - grubość warstwy, w której płynie prąd,  $\delta$  - wysokość szczeliny powietrznej,  $\Theta$  - prąd liniowy,  $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  $\tau$  - podziałka biegunowa.

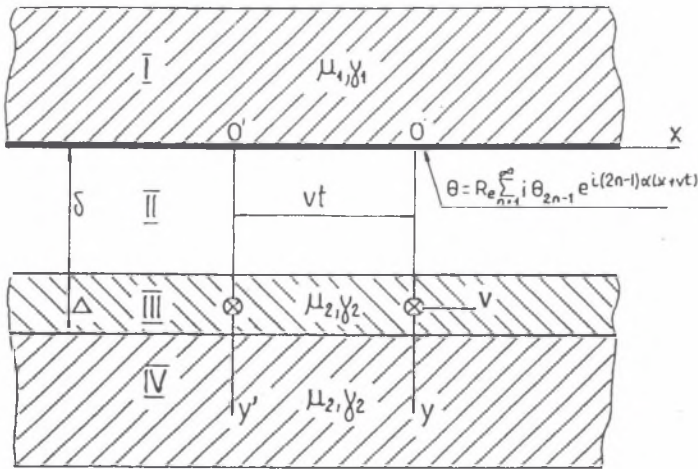
### 2.1. Model analityczny

Równania elektrodynamiczne Maxwella, dla wolno poruszającego się ferromagnetyka w polu magnetycznym, mogą być połączone dając w wyniku jedno równanie różniczkowe cząstkowe na magnetyczny potencjał wektorowy:

$$\nabla^2 A = \mu\gamma \left( \frac{\partial A}{\partial t} - v \times \nabla A \right). \quad (1)$$

Rozwiązanie równania (1) dla modelu, w którym prąd wirowy płynie w warstwie wierzchniej szyny, o skończonej grubości i stałej przenikalności magnetycznej, podano w pracy [3], stąd w niniejszym artykule przedstawione będą tylko końcowe wyniki tej analizy uzupełnione o następujące założenie:

- warstwa wierzchnia szyny o grubości  $\Delta^*$  wykazuje przenikalność magnetyczną równą  $\mu_0$ ,
- warstwa wierzchnia szyny o grubości  $\Delta^{**}$  wykazuje przenikalność magnetyczną równą  $\mu_2$ .



Rys. 1. Jednowymiarowy quasi-statyczny model hamulca wiroprowadowego  
 Fig. 1. One dimensional quasi-static brake model used for analysis

Stąd dla quasi-jednowymiarowego modelu, przedstawionego na rys. 1 magnetyczny potencjał wektorowy w szczelinie powietrznej i wierzchniej warstwie szyny kolejowej (o grubości  $\Delta = \Delta^*$ ) wyrazi się więc odpowiednio wzorami:

$$A_{II}(x, y, t) = -i \frac{2\mu_0\mu_1}{(\mu_0 + \mu_1)\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Theta_{2n-1}}{S_{2n-1}} \{ \cosh[(2n-1)q\Delta] \cosh[(2n-1)(y-\delta)\alpha] - u \sinh[(2n-1)(y-\delta)\alpha] \sinh[(2n-1)q\Delta] \} e^{i\alpha(2n-1)(x+vt)} \quad (2)$$

gdzie:

$$S_{2n-1} = \{ \cosh[(2n-1)q\Delta] + uq \sinh[(2n-1)q\Delta] \} \{ \sinh[(2n-1)\alpha\delta] + \cosh[(2n-1)\alpha\delta] \} + m \{ \cosh[(2n-1)q\Delta] - uq \sinh[(2n-1)q\Delta] \} \{ \cosh[(2n-1)\alpha\delta] - \sinh[(2n-1)\alpha\delta] \}$$

$$u = \frac{\mu_0}{\mu_2 \alpha}, \quad m = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\mu_0 + \mu_1}, \quad q^2 = \alpha^2 + i\mu_2\gamma_2 v.$$

$$A_{III}(x, y, t) = -i \frac{2\mu_0\mu_1}{(\mu_0 + \mu_1)\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Theta_{2n-1}}{S_{2n-1}} \{ \cosh[(2n-1)(y-\delta-\Delta)q] \} e^{i\alpha(2n-1)(x+vt)} \quad (3)$$

## 2.2. Siła hamująca

Przeprowadzona powyżej analiza rozkładu pola magnetycznego w szynie kolejowej pod płożą hamulca wiroprowadowego pozwala na wyznaczenie siły hamującej działającej na płożę tego hamulca. W tym celu przekształcono wzór Ampera do postaci:

$$F_x = \frac{\gamma_2}{2} \int_{-r_L}^r \int_{\delta}^{\delta+\Delta} \operatorname{Re} \left( \frac{\partial A_{III}}{\partial t} \frac{\partial A_{III}^*}{\partial x} \right) dy dx, \quad (4)$$

gdzie:

$$A_{III}^*(x, y, t) = i \frac{2\mu_0\mu_1}{(\mu_0 + \mu_1)\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Theta_{2n-1}}{S_{2n-1}^*} \{ \cosh[(2n-1)(y-\delta-\Delta)q^*] \} e^{-i\alpha(2n-1)(x+vt)}$$

czyli:

$$F_x = \frac{\mu_0^2\mu_1^2\gamma_2\tau v}{(\mu_0 + \mu_1)ab} \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{2n-1}^2 \frac{b + a \sin[(2n-1)2b\Delta] \sinh^{-1}[(2n-1)2a\Delta]}{S_{a_{2n-1}} + S_{b_{2n-1}} + S_{c_{2n-1}}}, \quad (5)$$

gdzie:

$$a = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + [1 + (\alpha\Delta)^{-4}]^{0.5}}, \quad b = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{-1 + [1 + (\alpha\Delta)^{-4}]^{0.5}},$$

$$S_{a_{2n-1}} = \{ 2^{-1} \operatorname{ctgh}[(2n-1)a\Delta] - \sin^2[(2n-1)b\Delta] \sinh^{-1}[(2n-1)2a\Delta] \} \times \\ \times \{ (1-m^2) \sinh^2[(2n-1)2\alpha\delta] + (1+m^2) \cosh^2[(2n-1)2\alpha\delta] + m^2 \},$$

$$S_{b_{2n-1}} = u \{ a - b \sin[(2n-1)2b\Delta] \sinh^{-1}[(2n-1)2a\Delta] \} \times \\ \times \{ (1+m^2) \sinh[(2n-1)2\alpha\delta] + (1-m^2) \cosh[(2n-1)2\alpha\delta] \}$$

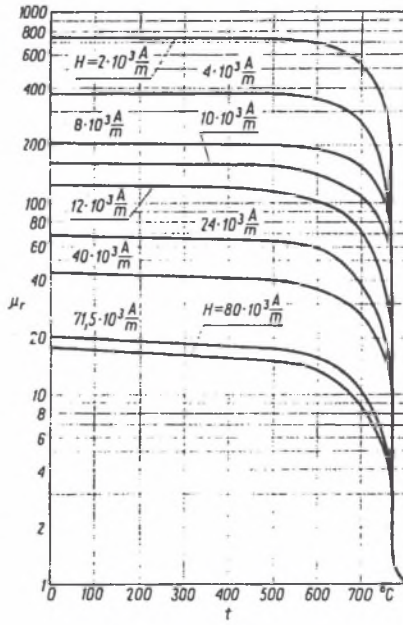
$$S_{c_{2n-1}} = u^2 \{ a^2 + b^2 \} \{ 2^{-1} \operatorname{tgh}[(2n-1)a\Delta] + \sin^2[(2n-1)b\Delta] \sinh^{-1}[(2n-1)2a\Delta] \} \times \\ \times \{ (1-m^2) \sinh[(2n-1)2\alpha\delta] + (1+m^2) \cosh[(2n-1)2\alpha\delta] - 2m \}.$$

$$\Delta = \Delta^* + \Delta^{**}. \quad (6)$$

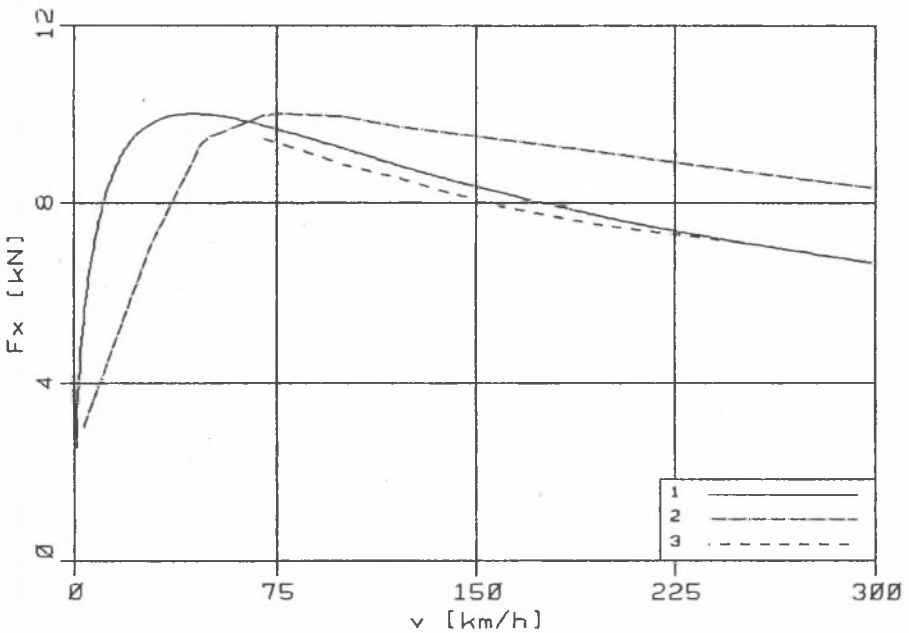
gdzie:

$$\Delta^* = \frac{1}{\sqrt{\mu_2\gamma\alpha v}}$$

Powyższe wzory pozwalają na analizowanie wpływu temperatury na własności hamulca wiroprowadowego. We wzorze (6) wielkość  $\Delta^*$  jest funkcją temperatury, zgodnie z rys. 2 [4], na którym przedstawiono zależność względnej przenikalności amagnetycznej  $\mu_r$  (dla stali) od temperatury. Początkowo temperatura bardzo nieznacznie wpływa na  $\mu_r$ , dopiero po przekroczeniu punktu Curie stał gwałtownie traci własności magnetyczne. Występuje wtedy zjawisko wzrostu grubości warstwy  $\Delta^*$ , w której płynie prąd wirowy do momentu uzyskania równowagi na granicy punktu Curie. Proces ten jest skomplikowany z uwagi na występujące zjawisko przewodnictwa cieplnego, które powinno się uwzględnić, co czyni problem bardzo złożonym. Dlatego w omawianym modelu hamulca wiroprowadowego wstępnie założono, że proces nagrzewania się warstwy wierzchniej odbywa się bez wymiany ciepła z otoczeniem. Rozwiązano model jako jednowarstwowy i dopiero do uzyskanego równania (5) wstawiono zależność (6), tworząc w ten sposób model dwuwarstwowy. Dane do obliczeń przyjęto na podsta-



Rys. 2. Zależność względnej przenikalności amagnetycznej  $\mu_r$  od temperatury  
 Fig. 2. The dependence of relative magnetic permeability  $\mu_r$  on temperature



Rys. 3. Siła hamująca w funkcji prędkości  
 Fig. 3. Braking force as a function of speed



wie danych hamulca wiropądowego firmy Knorr [2] oraz z charakterystyki przedstawionej na rys.2. Wyniki analizy przedstawiono na rys.3. Zestawiono trzy charakterystyki: krzywa 1 - uzyskana na podstawie wzoru (5), krzywa 2 - badania modelowe na stanowisku doświadczalnym [2], krzywa 3 - badania pociągu eksperymentalnego ICE [1]. Na podstawie powyższego zestawienia charakterystyk można stwierdzić, że projektując hamulec kolejowy [2] przyjęto zbyt małą podziałkę biegunową, co spowodowało niekorzystne przesunięcie charakterystyki hamulca przy równoczesnym niebezpiecznym wzroście temperatury powierzchni szyny. Grubość warstwy wierzchniej szyny, w której płynie prąd wirowy, jest zgodnie z wzorem (6), zależna od podziałki biegunowej i przenikalności magnetycznej, dlatego właściwy dobór tych parametrów jest bardzo ważny przy projektowaniu hamulca wiropądowego.

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Badania hamulca wiropądowego firmy Knorr, prowadzone w połowie lat osiemdziesiątych przez DB [1], wykazały dużą rozbieżność pomiędzy oczekiwaną charakterystyką hamulca a wynikami eksperymentu. Hamulec został zaprojektowany na podstawie badań eksperymentalnych prowadzonych na stanowisku doświadczalnym [2] wykonanym w skali 1:1. Stanowisko to nie dawało możliwości badania wpływu temperatury na charakterystykę hamulca (cała energia hamowania wydzielala się w tarczy). Z tej przyczyny projektując hamulec kolejowy przyjęto zbyt małą podziałkę biegunową, co spowodowało niekorzystne przesunięcie charakterystyki hamulca przy równoczesnym niebezpiecznym wzroście temperatury powierzchni szyny. Szczególnie szkodliwy jest nadmierny wzrost temperatury wierzchniej warstwy szyny, który może prowadzić do zmian własności materiału szyny. Zaprezentowany w artykule model hamulca wiropądowego umożliwia (poprzez badania porównawcze z badaniami empirycznymi) właściwy dobór parametrów hamulca w zakresie jego praktycznej stosowalności.

### LITERATURA

1. Hendrichs W.: Versuche mit linearen Wirbelstrombremsen Messungen mechanischer Greuße. Glasers Annalen, H. 9, 1985.
2. Kroger U.: Prinzip, entwicklung und konstruktion der linearen wirbelstrombremsen. Glasers Annalen, H. 9, 1985.
3. Skowron J.: Mathematical model of linear eddy curent brake unstable motion of the vehicle. Czasopismo Techniczne, 5/M, Kraków1995.
4. Turowski J.: Elektrodynamika techniczna. Wydawnictwo naukowo - techniczne, Warszawa 1968.

Recenzent: Dr hab. Wiesław Grzesikiewicz  
Prof. Politechniki Warszawskiej

**Abstract**

The model of linear eddy-current brake presented in the article facilitates the calculation of the brake operation characteristics in the range of its applicability. The analysis is actually two-dimensional since it assumes current directions in the active zone, the directions being perpendicular to the brake motion direction. The results, however, make it possible to obtain quite good approximation of the braking force caused by the linear eddy-current brake due to its geometrical shape (the width of the brake negligible in reference to its length), which makes the lateral boundary effect negligible.