

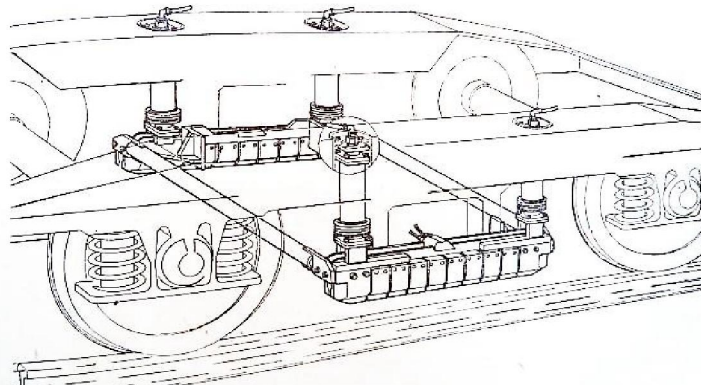
Jacek Skowron

Instytut Pojazdów Szynowych
Politechnika Krakowska, 31-864 Kraków, al. Jana Pawła II 37
E-mail: jskowron@mech.pk.edu.pl

Hamulce elektromagnetyczne w pojazdach szynowych

1 Wstęp

Szynowe hamulce elektromagnetyczne dzielą się na elektromagnesy wzdłużne i poprzeczne. Podział ten związany jest z ułożeniem biegunów płozy hamulca względem szyny. Elektromagnesy poprzeczne to klasyczne hamulce szynowe ze szczeliną powietrzną biegnącą wzdłuż osi szyny, natomiast elektromagnesy wzdłużne to nowa generacja szynowych hamulców wiroprądowych. Hamulce wiroprądowe różnią się od hamulców szynowych nie tylko konstrukcją biegunów, ale i sposobem zawieszenia płozy hamulca na wózku (płozą jest mocowana na obudowie łożysk zestawów kołowych). Ponadto płoza hamulca wiroprądowego w trakcie hamowania nie styka się z szyną, ale znajduje się w odległości kilku milimetrów (6 - 7) nad główką szyny.



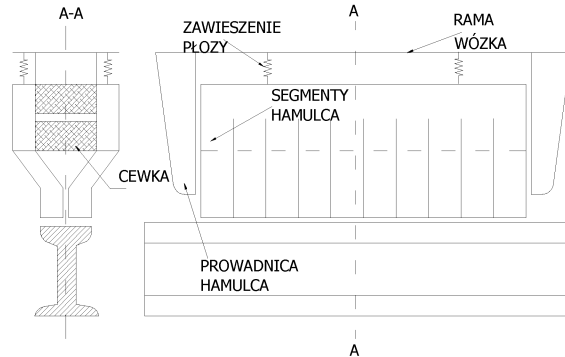
Rys. 1. Schemat zawieszenia hamulca szynowego na wózku [1]

Fig. 1. Scheme of the rail brake suspension on a bogie [1]

Hamulec szynowy (Rys. 1) składa się z płozy, która jest zawieszona między zestawami kołowymi i mocowana przewodnicami do ramy wózka w pewnej niewielkiej odległości nad główką szyny. Przez wzbudzenie uzwojenia magnetycznego wewnątrz płozy hamulca jego obwód magnetyczny zamyka się przez szynę, która stanowi zworę tego obwodu. Powstająca siła elektromagnetyczna przyciska płozę hamulca do powierzchni szyny i siłą hamującą wytwarza tarcie powierzchni hamulca (płozy) o szynę. Siła hamująca jest tu niezależna od przyczepności kół i zależy tylko od siły nacisku oraz od współczynnika tarcia ślizgowego między płozą a szyną. Płozą hamulca jest dociskana

do szyny z siłą zależną od wielkości indukcji magnetycznej wytworzonej przez uzwojenie wzbudzenia i powierzchni styku płozy z szyną.

Na rysunku 2 przedstawiono budowę hamulca szynowego z płozą segmentową. Taka konstrukcja zapewnia lepsze przyleganie płozy do szyny, szczególnie w zakresie wysokich prędkości hamowania.

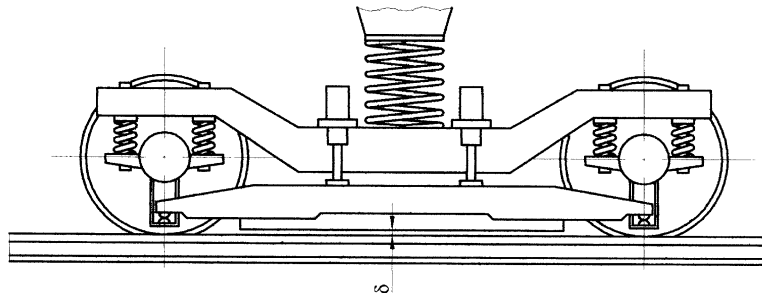


Rys. 2. Budowa hamulca szynowego

Fig. 2. The structure of a rail brake

Bardzo ważnym zagadnieniem jest właściwy dobór materiału na wkładkę cierną mocowaną do powierzchni płozy. Nakładka ta musi charakteryzować się dobrymi własnościami ciernymi (wysokim współczynnikiem tarcia oraz niską ścieralnością) i dobrymi własnościami magnetycznymi (wysoka wartość przenikalności magnetycznej). Niestety obie te wielkości w materiałach ferromagnetycznych są przeciwstawne.

Hamulce szynowe stosowane są najczęściej jako hamulce bezpieczeństwa w tramwajach i w szybkich jednostkach pociągowych na kolejach. Do hamowania eksploatacyjnego nadają się mniej, ponieważ powierzchnie styku płozy ścierają się szybko i wymagają częstej wymiany, a ponadto wycierałyby one główki szyn w rejonach częstego hamowania. Jako hamulce bezpieczeństwa nie mają regulacji siły docisku do szyny, ale nastawione są zawsze na maksymalną wartość prądu.



Rys. 3. Wózek z zabudowanym hamulcem wiropiędowym

Fig. 3. The structure of a rail brake

Względny ruch pola magnetycznego wytworzonego przez elektromagnes hamulca indukuje w główce szyny prądy wirowe, które osłabiają pierwotną indukcję magnetyczną, zmniejszając tym samym wielkość siły nacisku płozy hamulca na szynę. Prądy te wytwarzają również dodatkową elektrodynamiczną siłę hamującą, która jest zależna od prędkości. Niemniej osłabienie pola magnetycznego wywołane przez prądy wirowe powoduje także jego zmniejszenie, że sumaryczna siła hamująca może być mniejsza, niż byłaby bez ich oddziaływania.

Ponadto prądy te mogą powodować zakłócenia w pracy urządzeń sygnalizacji torowej. Z tego powodu kształt płozy hamulca jest tak uformowany, aby możliwie maksymalnie zmniejszyć efekt prądów wirowych.

Badania nad kolejowymi hamulcami wiropięrowymi (Rys. 3) były prowadzone od początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku przez zachodnie ośrodki doświadczalne, prowadzące badania nad hamulcami dla szybkich pociągów. Hamulec ten ma szereg korzystnych cech, takich jak: niezależność od przyczepności, brak zużywania się płozy, oddawanie energii w czasie hamowania do szyn, 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 praktycznie jedynym dodatkowym hamulcem, który może zapewnić skuteczne hamowanie przy bardzo dużych prędkościach jazdy.

Moc rozwijana przez hamulec, przy prędkościach bliskich 300 km/h, wynosi około 600 kW i cała ta moc hamowania tracona jest w wierzchniej warstwie szyny (w której płynie prąd wirowy), o grubości rzędu kilku milimetrów. Pociąg składający się z dziesięciu wagonów miałby 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 wynosi około 7200C), zmieniając jej własności magnetyczne. Rozwiązano ten problem, stosując przemiennie wózki napędne (bez hamulca wiropięrowego) i wózki toczne wyposażone w ten typ hamulca.

2 Model matematyczny hamulca szynowego

Model fizyczny przedstawiony na rysunku 4 można opisać równaniem falowym w postaci:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} . \quad (1)$$

Rozwiązanie równania (1) dla tego modelu podano w pracy [2], stąd w niniejszym artykule przedstawione będą tylko końcowe wyniki tej analizy.

Oznaczenia użyte w artykule:

\mathbf{B} – wektor indukcji magnetycznej, \mathbf{E} – wektor natężenia pola elektrycznego, \mathbf{J} – wektor gęstości prądu wirowego, \mathbf{v} – prędkość, γ – przewodność elektryczna szyny, μ – przenikalność magnetyczna szyny, $2h$ – grubość warstwy wierzchniej szyny, w której płynie prąd wirowy, n – liczba porządkowa harmonicznej.

W celu rozwiązania równania (1) skorzystano ze związków pomiędzy miarami składowych wektorów B , E i J :

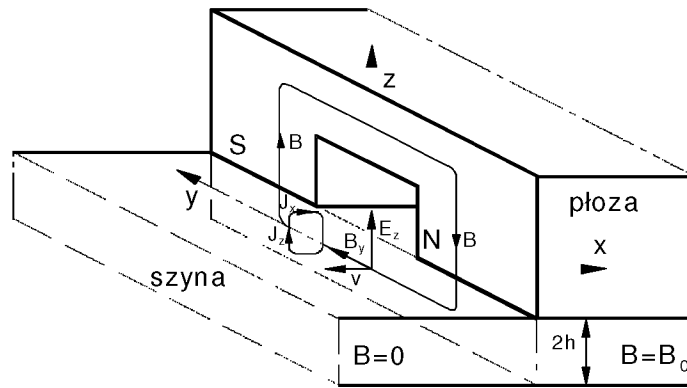
$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\text{rot } E, \quad J = \gamma E, \quad J = \frac{1}{\mu} \text{rot } B.$$

Ponadto zgodnie z modelem fizycznym można przyjąć:

$$B_x = B_z = 0,$$

stąd

$$J_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial B_y}{\partial z}, \quad J_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial B_y}{\partial x}. \quad (2)$$



Rys. 4. Model fizyczny hamulca szynowego

Fig. 4. Physical model of a rail brake

Zgodnie z rysunkiem 4 indukcja magnetyczna B_y w szynie (płytcie) zmienia się na krawędzi czołowej płozy (przy $v = 0$) skokowo od zera do wartości $B_y = B_0$. Określenie rozkładu indukcji magnetycznej w płycie (szynie) pozwala skorzystać z zależności (2) do obliczenia składowych J_x i J_z [2] wektora gęstości prądu wirowego.

Ponadto, posługując się zależnościami (3) i (4), można wyznaczyć siłę hamującą wytwarzaną przez prądy wirowe:

$$P_t = \frac{a}{\gamma} \int_{-h}^h \left[\int_{-\infty}^{\infty} (J_x^2 + J_z^2) dx \right] dz, \quad (3)$$

$$F_{xc} = \frac{2P_t}{v}, \quad (4)$$

stąd

$$F_{xc} = \frac{32a h \gamma v B_0^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \sqrt{(\alpha \gamma v)^2 + 4\alpha^2 (2n-1)^2}}, \quad (5)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{\pi}{2h}.$$

Celem zbadania wpływu elektrodynamicznej siły hamującej na charakterystykę hamulca posłużono się współczynnikiem tarcia ślizgowego dla stali St3S po szynie kolejowej, wyznaczonym empirycznie i przedstawionym w postaci wykresu $f(v)$ [3]. Ponadto dla ułatwienia analizy aproksymowano ten wykres funkcją:

$$f = 0,303 + 0,00076 v - 0,071 \log v . \quad (6)$$

Następnie wyznaczono siłę tarcia wytwarzaną przez płożę hamulca szynowego o długości $l = 1,5$ m z wzoru (7):

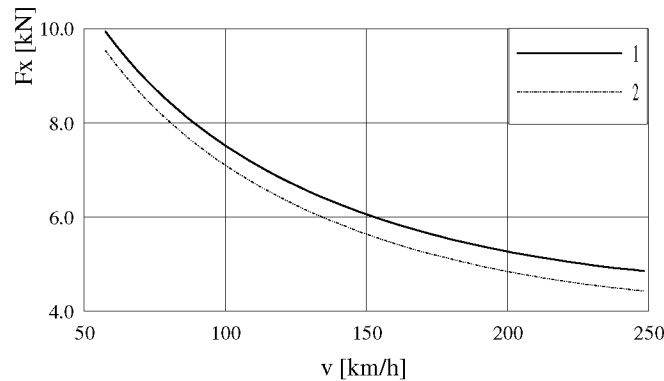
$$F_{xt} = \frac{B_0^2 a l}{2 \mu_0} f . \quad (7)$$

Zależność (7) nie uwzględnia osłabienia pola magnetycznego wywołanego przez prądy wirowe (założono, że indukcja magnetyczna B ma wartość stałą niezależną od prędkości). Badania symulacyjne wykonano, zastępując szynę kolejową płytą o grubości $2h = 50$ mm oraz przyjmując następujące dane:

$\mu_w = 25$, $\gamma = 2 \times 10^6$ 1/Ωm, $l = 1500$ mm, $a = 60$ mm, $B_0 = 1,5$ T, $n = 100$.

Następnie w celu porównania wpływu siły elektrodynamicznej na charakterystykę hamulca zsumowano obydwie składowe siły hamującej:

$$F_h = F_{xc} + F_{xt}. \quad (8)$$



Rys. 5. Siła hamująca hamulca szynowego

Fig. 5. Braking force of a rail brake

Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 5, gdzie krzywa 1 odpowiada zależności (8), natomiast krzywą 2 obliczono na podstawie równania (7). Różnica pomiędzy wartościami obu funkcji wynosi około 10%. Należy tu podkreślić, że wyniki te uzyskano, nie uwzględniając zjawiska osłabienia wartości indukcji magnetycznej B przez prądy wirowe.

3 Model matematyczny hamulca wiroprowadowego

Zasadniczym problemem w rozpatrywanych modelach hamulca wiroprowadowego jest zagadnienie wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w szczelinie powietrznej hamulca oraz szynie kolejowej i płożie. W niniejszej pracy analizę tę prowadzono przy

użyciu tzw. modelu grubopłytkowego [4]. W modelu tym przyjęto, że warstwa wierzchnia szyny (Rys. 6), w której płynie prąd wirowy, jest skończona i równa głębokości wnikania prądu wirowego w szynę.

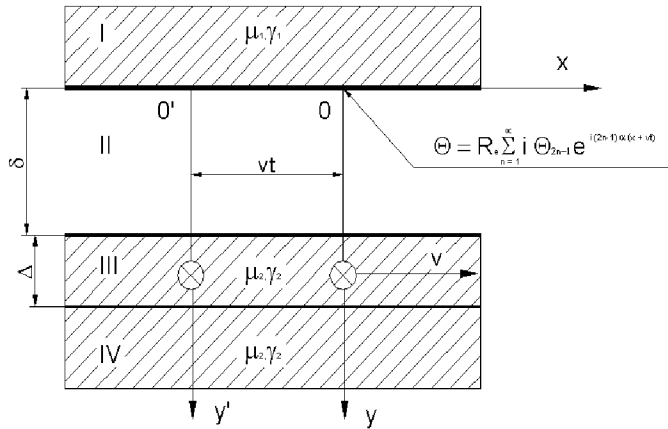
Oznaczenia symboli użytych w rozdziale:

A - magnetyczny potencjał wektorowy, A^* - wektor sprzężony, Θ - prąd liniowy, t - czas, v - prędkość, γ - przewodność elektryczna, Δ - grubość warstwy w której płynie prąd, δ - wysokość szczeliny powietrznej, μ - przenikalność magnetyczna, τ - podziałka biegunowa (patrz rysunek 6).

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:

$$\nabla^2 A = \mu\gamma \left(\frac{\partial A}{\partial t} - v \times \nabla A \right). \quad (9)$$

Rozwiązanie równania (9) dla trójwymiarowego modelu hamulca wiropądowego jest skomplikowane i nie będzie rozpatrywane. Geometryczny kształt hamulca uzasadnia wprowadzenie uproszczeń, które umożliwiają zastąpienie modelu trójwymiarowego quasi-jednowymiarowym modelem pokazanym na rysunku 6.



Rys. 6. Model fizyczny hamulca wiropądowego
 Fig. 6. Physical model of eddy current brake

Otrzymany rozkład pola magnetycznego w szynie kolejowej w czasie pracy hamulca wiropądowego pozwala na wyznaczenie siły hamującej działającej na płożę hamulca. W tym celu przekształcono wzór Ampera do postaci:

$$F_x = -\frac{\gamma_2}{2} \int_{-\delta}^{\tau} \int_{\delta}^{\delta+\Delta} \operatorname{Re} \left(\frac{\partial A_{III}}{\partial t} \frac{\partial A_{III}^*}{\partial x} \right) dy dx, \quad (10)$$

stąd

$$F_x = -\frac{\mu_0^2 \mu_1 \gamma_2 \tau v}{(\mu_0 + \mu_1) ab} \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{2n-1}^2 \frac{b \sinh[(2n-1)2\alpha\Delta] + a \sinh[(2n-1)2\alpha\Delta]}{S_{a_{2n-1}} + S_{b_{2n-1}} + S_{c_{2n-1}}}, \quad (11)$$

gdzie

$$\Theta = -i \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{2n-1} e^{i\alpha(2n-1)(x+vt)}, \quad \alpha = \frac{\pi}{\tau},$$

$$a_1 = -\alpha^2, \quad b_1 = \sqrt{\alpha^4 + (\mu_2^2 \gamma_2^2 \alpha^2 v^2)},$$

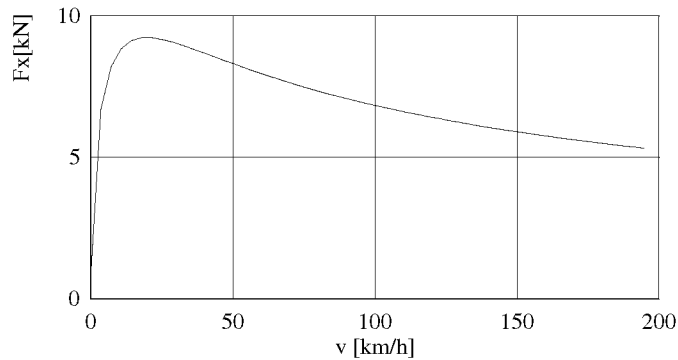
$$a = \frac{(a_1 + b_1) \sqrt{a_1 - b_1}}{\mu_2 \gamma_2 \alpha v \sqrt{2}}, \quad b = \frac{a_1 - b_1}{\sqrt{2}}, \quad u = \frac{\mu_0}{\mu_2 \alpha}, \quad m = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\mu_0 + \mu_1},$$

$$\begin{aligned} S_{a_{2n-1}} &= \frac{1}{2} u^2 (a^2 + b^2) \{ \cosh[2(2n-1)a\Delta] - \cos[2(2n-1)b\Delta] \} + \\ &+ u \{ a \sinh[2(2n-1)a\Delta] - b \sin[2(2n-1)b\Delta] \} \times \\ &\times \{ \cosh[2(2n-1)\alpha\delta] + \sinh[2(2n-1)\alpha\delta] \}, \\ S_{b_{2n-1}} &= m \{ \cos[2(2n-1)b\Delta] + u^2 (a^2 + b^2) \{ \cos[2(2n-1)b\Delta] - \cosh[2(2n-1)a\Delta] \} \\ &+ \cosh[2(2n-1)a\Delta] \}, \\ S_{c_{2n-1}} &= m^2 \{ \cos[2(2n-1)b\Delta] - \cosh[2(2n-1)b\Delta] + u^2 (a^2 + b^2) \{ \cosh[2(2n-1)a\Delta] - \\ &- \cos[2(2n-1)b\Delta] \} + 2u \{ b \sin[2(2n-1)b\Delta] - a \sinh[2(2n-1)a\Delta] \} \} \times \\ &\times \frac{1}{2} \{ \cosh[2(2n-1)\alpha\delta] - \sinh[2(2n-1)\alpha\delta] \}. \end{aligned}$$

Równanie (11) stanowi analityczne wyrażenie na siłę hamującą działającą na parę biegunów hamulca o jednostkowej szerokości. Zależność ta pozwala na wyznaczenie siły hamującej w funkcji prędkości generowanej przez hamulec liniowy w procesie hamowania.

Do obliczeń siły hamującej przyjęto następujące dane hamulca:

$$\mu_1 = 100, \mu_2 = 50, \Theta = 2,3 \cdot 10^5 \text{ A/m}, l = 0,07 \text{ m}, \tau = 0,18 \text{ m}, \delta = 0,006 \text{ m}, \gamma_2 = 2,3 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega\text{m}, p = 3$$



Rys. 7. Zależność siły hamującej hamulca wiropądowego w funkcji prędkości

Fig. 7. Braking force of the eddy-current brake

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg siły hamującej w funkcji prędkości, wytwarzanej przez hamulec wiropądowy. Uzyskany wynik jest porównywalny z badaniami empirycznymi prowadzonymi przez koleje niemieckie [5].

4 Wnioski

Opracowane modele fizyczne i matematyczne pozwalają na analizę zjawisk elektromagnetycznych i elektrodynamicznych występujących podczas pracy hamulców tego typu. W szczególności model matematyczny hamulca szynowego umożliwia określenie czy prąd wirowy generowany przez hamulec osłabia w takim stopniu pierwotne pole magnetyczne, że sumaryczna siła hamująca (tarcia i elektrodynamiczna) może być mniejsza od samej siły tarcia. W drugiej części pracy przedstawiono model matematyczny hamulca wiropądowego tzw. model grubo-płytkowy. Model ten jest dokładniejszy niż tzw. model cienko-płytkowy, w którym zakłada się, że prąd wirowy płynie w warstwie wierzchniej szyny o nieskończenie małej grubości. Obydwa przedstawione w pracy modele hamulców elektromagnetycznych sformułowano w celu badania zjawisk elektromagnetycznych i elektrodynamicznych występujących w procesie hamowania pojazdu szynowego.

Literatura

1. Janiak M., Kalinkowski A., *Konstrukcja i eksploatacja wagonów kolejowych*, WKiŁ, Warszawa 1979
2. Skowron J.: *Prądy wirowe w kolejowym hamulcu szynowym – model matematyczny*. Dynamika pojazdów szynowych i optymalizacja ich podukładów. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*, Zeszyt nr 10, Kraków 1996
3. Grajner J, Słomski W.: *Hamulec szynowy – badania eksperymentalne i teoretyczne*. Wybrane problemy transportu szynowego w 150-lecie kolei polskich. Kraków, Zakopane 1997
4. Skowron J.: Mathematical model of linear eddy current brake unstable motion of the vehicle. *Czasopismo Techniczne*, 5/M, Kraków 1995

5. Kunz M., Graber J.: Integration der linearen Wilberstrombremse des ICE3 in die Infrastruktur – technische Aspekte und Betriebserfahrungen. *Eisenbahn Technische Rundschau* H 7/8, 2004

Streszczenie

Praca zawiera wyprowadzenie wzorów (w oparciu o równania Maxwella) pozwalające wyznaczyć rozkład prądów wirowych w szynie kolejowej pod płozą hamulca szynowego w czasie procesu hamowania. Ponadto w drugiej części pracy przeprowadzono podobną analizę dla liniowego hamulca wiropądowego. Przedstawione modele matematyczne hamulców elektromagnetycznych umożliwią analizę zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w procesie hamowania.

Słowa kluczowe: pojazdy szynowe, hamulce szynowe, hamulce wiropądowe

Braking force of the eddy-current brake

Summary

The work contains elaboration of the formulas (depending on Maxwell theory) enabling determination of eddy-current distribution in a rail under a brake shoe during braking process. Moreover in the second part of the work the similar analysis has been performed for a linear eddy-current brake. Presented mathematical models of electromagnetic brakes enable analysis of electromagnetic phenomena occurring at braking process.

Keywords: rail vehicles, rail brakes, eddy-current brakes