

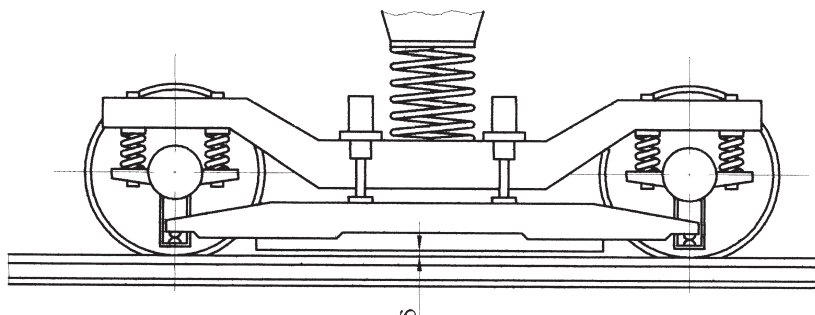
Jacek Skowron

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

Badanie wpływu indukcyjności na charakterystykę hamulca wiroprowadowego

1 Wstęp

Wprowadzenie liniowego hamulca wiroprowadowego do nowego taboru kolejowego zostało zakończone sukcesem (po kilkudziesięciu latach badań) w pociągu ICE-3 [1-2]. Pierwsze próby z tym hamulcem w wersji rotacyjnej prowadzone były w latach trzydziestych dwudziestego wieku, przez koleje niemieckie. Liniowy hamulec wiroprowadowy jest praktycznie jedynym dodatkowym hamulcem, który może zapewnić skuteczne hamowanie przy bardzo dużych prędkościach jazdy. Wynika to z zasady działania tego hamulca, gdzie w procesie hamowania energia kinetyczna hamowanego pociągu jest przekazywana do szyn, i stąd nawrót zainteresowania tym rozwiązaniem ośrodków doświadczalnych, prowadzących badania nad hamulcami dla super szybkich pociągów oraz pojazdów niekonwencjonalnych na poduszce magnetycznej.



Rys. 1. Wózek z liniowym hamulcem wiroprowadowym.

Fig. 1. Bogie with linear eddy current brake.

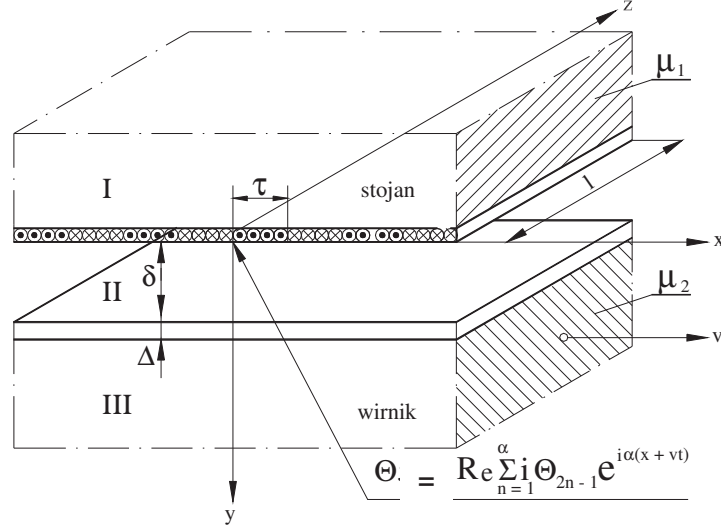
Hamulec ten podobnie jak hamulec szynowy jest umieszczony nad szyną (rysunek 1) między zestawami kołowymi i posiada szereg korzystnych cech, takich jak niezależność od przyczepności, brak zużywania się płozy, oddawanie energii w czasie hamowania do szyn, cicha praca oraz możliwość wykorzystywania go do hamowania służbowego. Zasadniczą wadą tego hamulca jest konieczność stosowania stosunkowo dużych mocy (≈ 40 kW na jeden hamulec) i łączące się z tym nagrzewanie się uzwojeń wzbudnika oraz nagrzewanie się szyn. Ponadto praca hamulca wywołuje zakłócenia w działaniu urządzeń sygnalizacyjnych. Mimo tych wad jest praktycznie jedynym dodatkowym hamulcem, który może zapewnić skuteczne hamowanie przy bardzo dużych

prędkościach jazdy i stąd nawrót zainteresowania tym rozwiązaniem kolejowych ośrodków doświadczalnych.

Hamulec wiroprowodowy można rozpatrywać jako maszynę elektryczną, czyli formę przetwornika elektromechanicznego, który przetwarza energię kinetyczną hamowania pociągu w energię elektryczną rozpraszaną w szynach kolejowych. Takie podejście do rozpatrywanego problemu zastosowano w niniejszej pracy. Model matematyczny hamulca zbudowano w oparciu o równania elektrodynamiczne Maxwella dla wolno poruszającego się ferromagnetyka. Uzyskane w równanie różniczkowe cząstkowe zostało rozwiązane z wykorzystaniem magnetycznego potencjału wektorowego. Okazało się, że znalezione rozwiązanie obciążone jest pewną niedokładnością wynikającą z przyjętych założeń upraszczających, (nieskończona przewodność i zerowa grubość warstwy wierzchniej szyny), które umożliwiły znalezienie rozwiązania symbolicznego modelu. Niedokładność ta polega na tym, że występująca w rozwiązaniu oporność powierzchniowa szyny zawiera tylko część czynną. W rzeczywistości oporność powierzchniowa szyny zawiera zarówno oporność czynną jak i bierną. Otrzymane w ten sposób rozwiązanie przedstawiono w postaci schematu zastępczego maszyny elektrycznej, nie zawiera oporności indukcyjnej a tylko oporność czynną. Stąd zaproponowano rozwiązanie polegające na wprowadzeniu dodatkowo w schemacie zastępczym maszyny oporności biernej o wartości równej oporności czynnej, co jest zgodne z badaniami empirycznymi [7]. Konsekwencją tej zmiany jest ponad dwukrotne obniżenie wartości maksymalnej siły hamującej (wyliczanej na podstawie tak uzyskanego wzoru).

2 Model analityczny hamulca wiroprowodowego

Model matematyczny hamulca zbudowano posługując się równaniami elektrodynamicznymi Maxwella dla wolno poruszającego się ferromagnetyka. Uzyskane w ten sposób równanie różniczkowe cząstkowe zostało rozwiązane z wykorzystaniem magnetycznego potencjału wektorowego [3-6]. W artykule przeprowadzono obliczenia rozkładu pola magnetycznego pod płożą hamulca i następnie w oparciu o wzór Ampera wyznaczono składową poziomą siły ponderomotorycznej.



Rys. 2 Model fizyczny hamulca wiropładowego.

Fig. 2 Physics model of eddy current brake.

Oznaczenia symboli użytych w artykule: A - magnetyczny potencjał wektorowy, 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, l - szerokość nabiegownika, n - liczba porządkowa harmonicznej, χ - współczynnik tarcia ślizgowej, p - liczba par biegunów. Geometryczny kształt hamulca (rysunek 2) uzasadnia wprowadzenie uproszczeń, które umożliwiają zastąpienie modelu trójwymiarowego modelem quasi-jednowymiarowym. Wówczas zgodnie z tymi uproszczeniami magnetyczny potencjał wektorowy ma tylko jedną składową $A = A_z$. Stąd dla pierwszej harmonicznej magnetyczny potencjał wektorowy w szczeliny powietrznej i wierzchniej warstwie szyny kolejowej (o grubości Δ) wyrazi się odpowiednio wzorami:

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

$$A_{II} = A_{II}^p + A_{II}^w, \quad (2)$$

gdzie:

$$A_{II}^p = i \frac{\mu_0 \theta_1}{\alpha} \left\{ \frac{\cosh \alpha y}{k_1} - \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_1 k_1} \right) \sinh \alpha y \right\} e^{i \alpha x}, \quad (3)$$

$$A_{II}^w = i \frac{\mu_0 \theta_1'}{\alpha} \left\{ \frac{\cosh[\alpha(y-\delta)]}{k_1'} + \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_2 k_1'} \right) \sinh[\alpha(y-\delta)] \right\} e^{i \alpha x}, \quad (4)$$

gdzie:

$$\theta_1' = -iv\mu_0\theta_1 \left\{ \frac{\cosh \alpha\delta}{k_1} - \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_1 k_1}\right) \sinh \alpha\delta \right\} \frac{1}{r + i \frac{\mu_0 v}{k_1}}, \quad (5)$$

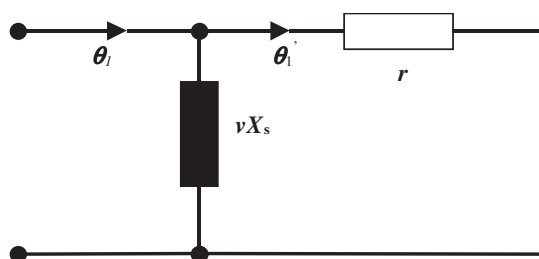
$$k_1 = \frac{\mu_0}{\mu_1} + \frac{\mu_2 \sinh \alpha\delta + \mu_0 \cosh \alpha\delta}{\mu_2 \cosh \alpha\delta + \mu_0 \sinh \alpha\delta},$$

$$k_1' = \frac{\mu_0}{\mu_2} + \frac{\mu_1 \sinh \alpha\delta + \mu_0 \cosh \alpha\delta}{\mu_1 \cosh \alpha\delta + \mu_0 \sinh \alpha\delta}, \quad r = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \lim_{\gamma \rightarrow \infty} (\gamma \Delta)^{-1}.$$

W mianowniku równania (5) występuje impedancja wirnika, której część bierną można zapisać w postaci:

$$X = \frac{\mu_0 v}{k_1} = v X_s. \quad (6)$$

Powyższe zależności pozwalają na skonstruowanie schematu zastępczego hamulca (rysunek 3). Schemat ten w obwodzie wirnika zawiera jedynie rezystancje co jest zgodne z przyjętym w modelu uproszczeniem, że powierzchnia wirnika ma tylko czynną oporność powierzchniową r .



Rys. 3 Schemat zastępczy hamulca wiropładowego z rezystancją w obwodzie wirnika.

Fig. 3 Scheme of eddy current brake with resistance in rotor circuit.

Możemy teraz wyznaczyć siłę hamującą F_x . W tym celu skorzystamy z równania Ampera w postaci:

$$F_x = - \int_{-\tau}^{\tau} \operatorname{Re} \left(\theta \frac{\partial A_{II}^{ws}}{\partial x} \right) dx, \quad (7)$$

stąd:

$$F_x = \frac{v r l \tau q_1 \Theta_1^2}{r^2 + X_s^2 v^2}, \quad (8)$$

gdzie:

$$q_1 = \left\{ \frac{\cosh \alpha\delta}{k_1} - \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_1 k_1}\right) \sinh \alpha\delta \right\} \left\{ \frac{\cosh \alpha\delta}{k_1'} - \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_2 k_1'}\right) \sinh \alpha\delta \right\}. \quad (9)$$

Z analizy ostatniej zależności wynika, że funkcja (8) posiada ekstremum. Maksimum tej siły występuje przy prędkości krytycznej:

$$v_k = \frac{k_1' r}{\mu_0} = \frac{r}{X_s}. \quad (10)$$

Natomiast wartość siły maksymalnej będzie równa:

$$F_k = \frac{\mu_0^2 l \tau q_1 \Theta_1^2}{2 X_s}. \quad (11)$$

Funkcję (8) można przedstawić również w postaci:

$$F_x = \frac{2 F_k}{\frac{v_k}{v} + \frac{v}{v_k}}. \quad (12)$$

Ostatnia zależność jest odpowiednikiem znanego wzoru Klossa na monet silnika asynchronicznego.

W rozważanym modelu przyjęto, że prąd wirowy indukowany w wirniku płynie w nieskończone cienkiej warstwie, a w rzeczywistości grubość tej warstwy może być aproksymowana głębokością wnikania fali elektromagnetycznej w wirnik:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{v \alpha \gamma_2 \mu_2}}. \quad (13)$$

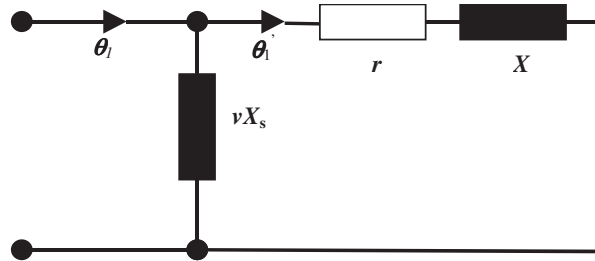
Wielkość ta odpowiada e – krotnemu zmniejszeniu się amplitudy fali w stosunku do jej wartości na powierzchni wirnika. Głębokość tego wnikania dla stali (zależnie od stopnia jej nasycenia) waha się od dziesiątych części milimetra do kilku milimetrów, dla częstotliwości przemysłowych. Impedancję tej warstwy określa zależność:

$$Z = (1+i) \sqrt{\frac{v \alpha \mu_2}{2 \gamma_2}}, \quad (14)$$

gdzie:

$$r = X = \sqrt{\frac{v \alpha \mu_2}{2 \gamma_2}}. \quad (15)$$

Z powyższej zależności wynika, że wirnik w stanie ustalonym wnosi do obwodu zastępczego hamulca nie tylko rezystancję powierzchniową r , ale również reaktancję powierzchniową X . W konsekwencji schemat zastępczy hamulca dla pierwszej harmonicznej otrzymany przy upraszczającym założeniu jedynie rezystancyjnej warstwy wierzchniej, trzeba uzupełnić przez dodanie reaktancji X (rysunek 4)



Rys. 4 Schemat zastępczy hamulca wirowprądowego z impedancją w obwodzie wirnika.
 Fig. 4 Scheme of eddy current brake with impedance in rotor circuit.

Podstawiając za tym do równania (11) wartość reaktancji zgodnie z przyjętym schematem zastępczym otrzymamy:

$$F_x = \mu_0^2 l \tau q_1 \Theta_1^2 \sqrt{\frac{v \alpha \mu_2}{2 \gamma_2}} \frac{1}{\frac{\alpha \mu_2}{\gamma_2} + v X_s^2 + 2 X_s \sqrt{\frac{v \alpha \mu_2}{2 \gamma_2}}}. \quad (16)$$

Funkcja ta podobnie jak równanie (2.11) posiada ekstremum, przy czym prędkość krytyczna równa się:

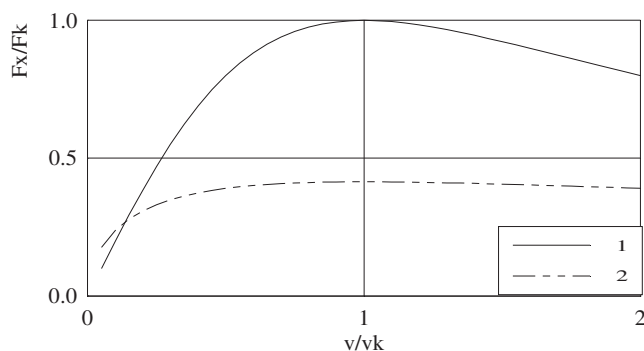
$$v_k = \frac{k_1^2 \alpha \mu_2}{\mu_0^2 \gamma_2}. \quad (17)$$

Natomiast siła maksymalna jest określona równaniem;

$$F_k = \frac{\mu_0^2 l \tau q_1 \Theta_1^2}{2 X_s (1 + \sqrt{2})}. \quad (18)$$

Porównując wzory (10), (15) i (17) okazuje się, że prędkość krytyczna dla modelu z samą reaktancją i modelu z impedancją jest identyczna. Podobnie porównując wzory (11) i (18) na siłę krytyczną, to stosując model z samą reaktancją otrzymamy, że wartość siły jest $(1 + \sqrt{2})$ razy większą niż przy modelu z impedancją.

Również porównano przebieg siły hamującej w funkcji prędkości generowanych przez oba modele. W tym celu skorzystano z równań (8) i (16), a wynik badań przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 5 Porównanie przebiegu siły hamującej w funkcji prędkości.

Fig. 5 Comparison of braking force characteristics as function of velocity.

Na rysunku 5 krzywa 1 została wyliczona według wzoru (8), natomiast krzywa 2 według wzoru (16). W zakresie niskich prędkości siła hamująca liczona według wzoru (16), w którym uwzględniono reaktancję powierzchniową wirnika narasta szybciej niż w modelu z samą rezystancją. Wynika to z założenia przyjętego przy konstruowaniu modelu, że reaktancja powierzchniowa jest równa rezystancji, co jest słuszne dla prędkości większych niż prędkość krytyczna. Dla niskich prędkości zgodnie z wzorem (13) przy $v \rightarrow 0$ głębokość wnikania fali elektromagnetycznej w materiał wirnika wzrasta teoretycznie do nieskończoności, a tym samym oporność powierzchniowa maleje do zera. W wiropądowym hamulcu kolejowym zakres praktycznej stosowalności zaczyna się od prędkości nieznacznie niższych niż $v = v_k$. Wynika stąd, że model z impedancją jest w pełni przydatny do projektowania kolejowych hamulców wiropądowych

3 Wnioski końcowe

Hamulec wiropądowy jest maszyną elektryczną, dla której można zbudować schemat zastępczy. Okazało się, że schemat zastępczy hamulca wiropądowego uzyskany w oparciu o przedstawiony model matematyczny obciążony jest pewną niedokładnością. Niedokładność ta polega na tym, że występująca w rozwiązaniu oporność powierzchniowa wirnika (szyny) zawiera tylko część czynną. W rzeczywistości (co potwierdzają badania empiryczne) oporność powierzchniowa szyny zawiera zarówno oporność czynną jak i bierną. Stąd zaproponowano rozwiązanie polegające na wprowadzeniu dodatkowo w schemacie zastępczym maszyny oporności biernej o wartości równej oporności czynnej. Uzyskane w ten sposób rozwiązanie przedstawiono w poprzednim rozdziale, w którym porównano obydwa modele. Model z impedancją w obwodzie wirnika lepiej odwzorowuje przebieg siły hamującej w funkcji prędkości, szczególnie w zakresie prędkości, które są stosowane w kolejowych hamulcach wiropądowych.

Literatura

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

2. Meier Credner W., Graber J.: *The Linear Eddy-Current Brake on the ICE3*. Eisenbahn Technische Rundschau H 6, 2000.
3. Skowron J. : *Analiza wyników badań hamulca wiroprądowego*. Polskie Towarzystwo Symulacji Komputerowej, WAT, IPPT PAN. Zakopane 2008.
4. Skowron J. : *Wpływ prądów wirowych na charakterystykę hamulca szynowego*. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Koszalin 2002.
5. .Skowron J.: *Wpływ ugięcia belki mocującej hamulec wiroprądowy na jego charakterystykę*. XIV Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Kraków–Arłamów 2000.
6. Skowron J.: *Mathematical model of linear eddy curent brake unstable motion of the vehicle*. Czasopismo Techniczne, 5/M, Kraków 1995.
7. .Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1967.

Streszczenie

Hamulec wiroprądowy można rozpatrywać jako maszynę elektryczną, czyli formę przetwornika elektromechanicznego, który przetwarza energię kinetyczną hamowania pociągu w energię elektryczną rozpraszaną w szynach kolejowych. Takie podejście do rozpatrywanego problemu zastosowano w niniejszej pracy. Otrzymane w ten sposób rozwiązanie przedstawiono w postaci schematu zastępczego maszyny elektrycznej, który nie zawiera oporności indukcyjnej a tylko oporność czynną. Stąd zaproponowano rozwiązanie polegające na wprowadzeniu dodatkowo w schemacie zastępczym maszyny oporności biernej o wartości równej oporności czynnej, co jest zgodne z badaniami empirycznymi.

Influence of inductance on characteristics of eddy current brake

Summary

Eddy current brake can be considered as an electric machine, i.e. type of electro-mechanical transformer, which shifts kinetic energy of braking train into electric energy dissipated in rails. A substitute model of electric machine is presented in the paper, which contains not only the active resistance in the rotor circuit, but also an inductance.

The magnitude of the passive resistance is matched the magnitude of the active resistance, what is in accordance with experiments.