

Jacek SKOWRON

Instytut Pojazdów Szynowych, Politechnika Krakowska

HYBRYDOWY HAMULEC SZYNOWO-WIROPRĄDOWY

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny hamulca szynowo-wiroprądowego oraz obliczoną charakterystykę teoretyczną tego hamulca. Analiza opiera się na rozwiązaniu równań opisujących rozkład magnetycznego potencjału wektorowego w szczelinie powietrznej pomiędzy płozą hamulca a szyną kolejową. Hamulec ten wytwarza siłę hamującą pochodzącą od prądów wirowych oraz dodatkowo od siły nacisku wywieranej przez płozę hamulca na szynę, stąd nazwa hamulec hybrydowy.

HYBRID RAIL EDDY CURRENT BRAKE

Summary. In the paper mathematical model of eddy current rail brake is presented and the theoretical characteristic of this brake is determined. Analysis is based on the solutions of the equations describing the magnetic vector potential distribution in the air gap between the brake skid and the rail. This brake causes the brake force resulting from the current and additionally from the brake skid force acting on the rail, the name hybrid brake comes from there.

1. WSTĘP

Hamulec szynowo-wiroprądowy może być (podobnie jak hamulec szynowy) wykorzystywany wyłącznie jako hamulec awaryjny. Składa się on z płozy umieszczonej nad główką szyny między zestawami kołowymi wózka pojazdu, która wytwarza stałe pole magnetyczne wzbudzając w przemieszczającej się szynie prądy wirowe. W takim rozwiązaniu płoza hamulca przyciągana elektromagnetycznie opada na szynę i siła hamująca powstaje w wyniku tarcia płozy o szynę oraz indukowania się prądów wirowych w szynie.

Idea takiej konstrukcji jest równie stara jak hamulec szynowy i znana jest pod nazwą hamulec szynowy typu poprzecznego (układ biegunów wzbudnika), podczas gdy powszechnie stosowany hamulec szynowy ma wzdłużny układ biegunów. Różnica - to wielobiegunowy układ hamulca hybrydowego, podczas gdy hamulec szynowy typu poprzecznego był hamulcem dwubiegunowym. Zainteresowanie zachodnich ośrodków badawczych [1] tym

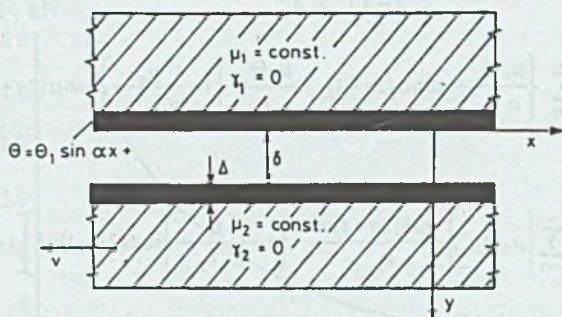
rozwiązaniem wynika z pewnych korzystnych cech, które preferują go jako hamulec awaryjny. W porównaniu z hamulcem szynowym, hamulec hybrydowy pozwala na uzyskanie znacznie korzystniejszej charakterystyki hamowania awaryjnego, szczególnie w zakresie wyższych prędkości. Wynika to z dodawania się do siebie obu składowych siły hamującej (siły tarcia i składowej poziomej siły ponderomotorycznej pochodzącej od prądów wirowych). Ponadto możliwe jest stosowanie na parę cierną hamulca wkładki o możliwie wysokim współczynniku tarcia (teoretycznie może być to wkładka z materiału niemagnetycznego). Hamulec szynowo-wiroprowodowy może być zawieszany na wózku identycznie jak hamulec szynowy i nie wymaga specjalnego sztywnego powiązania płoży hamulca z osiami zestawów kołowych w celu utrzymania stałej szczeliny powietrznej między płożą hamulca a szyną. Zakres prędkości, przy których można stosować hamulec hybrydowy, jest podobny jak dla hamulca szynowego. Hamulec hybrydowy absorbuje dużą część energii hamowanego wagonu [1]. Energia hamowania w całości jest zamieniana w ciepło, z tym że energia ta wydzielą się częściowo w parze cierniej płoża - szyna, a częściowo w warstwie wierzchniej szyny (w której płynie prąd wirowy), o grubości zależnej od podziałki biegunowej hamulca. Ta własność hamulca ma istotne znaczenie, gdyż umożliwia rozpraszanie większych ilości energii, a tym samym rozwijanie przez hamulec szynowo-wiroprowodowy większych mocy hamowania, niż występuje to w przypadku hamulca szynowego. Niemniej hamulec tego typu wymaga znacznie większych mocy do zasilania wzbudnika niż hamulec szynowy i zależne jest to od konkretnych zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

2. MODEL MATEMATYCZNY

Oznaczenia użyte w artykule: A - magnetyczny potencjał wektorowy, A^* - wektor sprzężony, Θ - prąd liniowy, v - prędkość, γ - przewodność elektryczna, δ - wysokość szczeliny powietrznej, Δ - grubość warstwy, w której płynie prąd, μ_1 - przenikalność magnetyczna płoży, μ_2 - przenikalność magnetyczna szyny, τ - podziałka biegunowa, l - szerokość główki szyny, χ - współczynnik tarcia, p - liczba par biegunów.

2.1. Model analityczny

Do analizy modelu hamulca szynowo-wiroprowodowego użyto (w części dotyczącej składowych siły ponderomotorycznej) zaadaptowanego modelu hamulca wiroprowodowego (rys. 1) rozwiązanego przez autora w pracy [2]. Obliczenie rozkładu pola magnetycznego pod płożą hamulca przeprowadzono metodą magnetycznego potencjału wektorowego. Następnie opierając się na wzorze Ampera wyznaczono składową poziomą siły ponderomotorycznej.



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

gdzie:

$$F_x = - \int_{-\tau}^{\tau} \text{Re} \left(\Theta \frac{\partial A_x^*}{\partial x} \right) dx, \quad (1)$$

$$A_x^* = i \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\mu_0 \Theta}{\alpha k_{2n-1}} \cosh \alpha (2n-1)(y-\delta) + \frac{\mu_0 \Theta}{\alpha} \left[1 - \frac{\mu_0}{\alpha k_{2n-1}} \right] \sinh \alpha (2n-1)(y-\delta) \right\} e^{i(2n-1)\alpha x},$$

$$\Theta = \text{Re} \left[i \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{2n-1} e^{i\alpha(2n-1)\alpha x} \right], \quad k_{2n-1} = \frac{\mu_0}{\mu_2} + \frac{\mu_1 \sinh(2n-1)\alpha\delta + \mu_0 \cosh(2n-1)\alpha\delta}{\mu_0 \sinh(2n-1)\alpha\delta + \mu_1 \cosh(2n-1)\alpha\delta},$$

$$r = \left(\frac{\mu_2 \alpha v}{\gamma} \right)^{0.5}, \quad k_{2n-1} = \frac{\mu_0}{\mu_1} + \frac{\mu_2 \sinh(2n-1)\alpha\delta + \mu_0 \cosh(2n-1)\alpha\delta}{\mu_0 \sinh(2n-1)\alpha\delta + \mu_2 \cosh(2n-1)\alpha\delta},$$

$$\Theta_{2n-1} = -v\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{2n-1} \frac{\frac{\cosh(2n-1)\alpha\delta}{k_{2n-1}} - \left[1 - \frac{\mu_0}{\mu_1 k_{2n-1}} \right] \sinh(2n-1)\alpha\delta}{\frac{\mu_0 v}{k_{2n-1}} - ir}, \quad \alpha = \frac{\pi}{\tau},$$

stąd:

$$F_x = -\mu_0 l \tau \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{2n-1}^2 \left\{ \frac{\frac{\cosh(2n-1)\alpha\delta}{k_{2n-1}} - \left[1 - \frac{\mu_0}{\mu_1 k_{2n-1}} \right] \sinh(2n-1)\alpha\delta}{\frac{v}{v_{2n-1}} + \frac{v_{2n-1}}{v}} \right\} \left\{ \frac{\cosh(2n-1)\alpha\delta}{k_{2n-1}} - \left[1 - \frac{\mu_0}{\mu_2 k_{2n-1}} \right] \sinh(2n-1)\alpha\delta \right\} \quad (2)$$

gdzie:

$$v_{2n-1} = \frac{k_{2n-1} r}{\mu_0}, \quad r = \left(\frac{\mu_2 v \alpha}{\gamma_2} \right)^{0.5}.$$

Następnie korzystając z przekształconego równania Maxwella, wyznaczono składową pionową siły ponderomotorycznej (siłę uciągu magnetycznego):

$$F_y = \frac{i}{2\mu_0} \int_{-\tau}^{\tau} \text{Re} (rot A)^2 dx \quad (3)$$

gdzie:

$$A = A_z^p + A_z^k,$$

$$A_z^p = i \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\mu_0 \Theta}{\alpha k_{2n-1}} \cosh \alpha(2n-1)y - \frac{\mu_0 \Theta}{\alpha} \left[1 - \frac{\mu_0}{\alpha k_{2n-1}} \right] \sinh \alpha(2n-1)y \right\} e^{i(2n-1)\alpha x},$$

stąd:

$$F_y = -\frac{l\tau}{2\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \mu_0 \Theta_{2n-1} \left[\frac{\cosh(2n-1)\alpha\delta}{k_{2n-1}} - \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_1 k_{2n-1}} \right) \sinh(2n-1)\alpha\delta \right] \left[1 - \frac{v}{v+v_{2n-1}} \right] \right\}^2 \quad (4)$$

Wzory (3) i (4) umożliwiają obliczenie składowych siły ponderomotorycznej wytwarzanej przez wzбудnik hamulca hybrydowego.

2.2. Siła hamująca

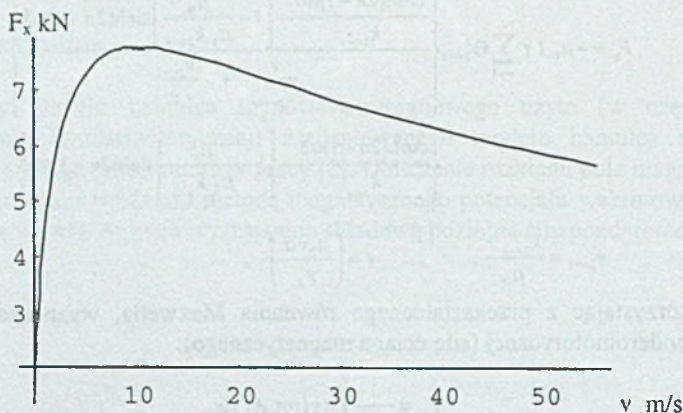
Siła hamująca wytwarzana przez hamulec hybrydowy powstaje w wyniku dodawania się do siebie dwu składowych siły hamującej (siły tarcia i składowej poziomej siły ponderomotorycznej). Obliczenie siły tarcia można przeprowadzić opierając się na wzorze (4) oraz korzystając z wyznaczonej empirycznie zależności wsólczynika tarcia [3] (pary czarnej płoza - szyna) od prędkości ślizgania. Powyże zależności pozwalają wyznaczyć siłę tarcia wytwarzaną przez hamulec hybrydowy w postaci:

$$F_t = \chi F_y \quad (5)$$

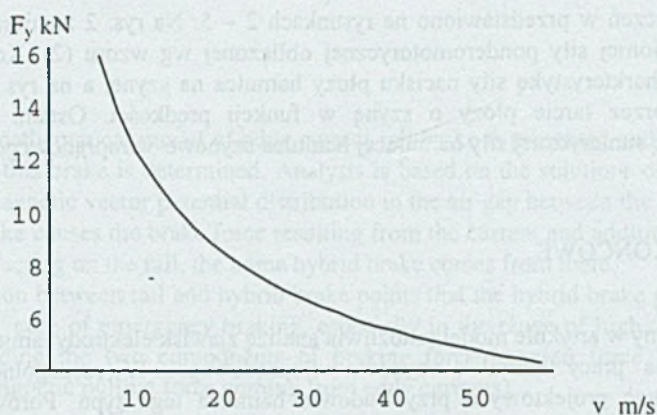
Mając teraz obie składowe siły hamujące można obliczyć całkowitą siłę hamującą wytwarzaną przez hamulec szynowo-wiroprowadowy jako:

$$F_h = F_x + F_t \quad (6)$$

W celu zbadania możliwości, jakie daje hamulec hybrydowy, przeprowadzono obliczenia składowych siły hamującej zakładając, że płoza hamulca styka się połową powierzchni z szyną, a pozostała jej część znajduje się w odległości 8 mm od główki szyny. Przyjęto do obliczeń następujące dane: $\mu_1 = 50\mu_0$, $\mu_2 = 60\mu_0$, $\Theta = 2.3 \cdot 10^5$ A/m, $l = 0.07$ m, $\tau = 0.18$ m, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^6$ 1/Ωm, $\delta = 0.008$ m, $p = 3$.

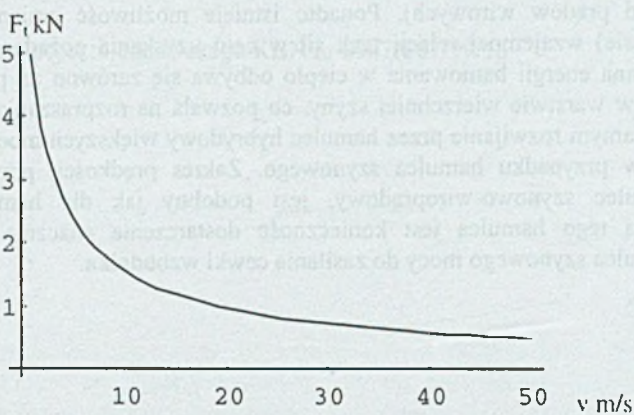


Rys. 2. Składowa pozioma siły ponderomotorycznej
Fig. 2. Horizontal component of magnetic pulling force



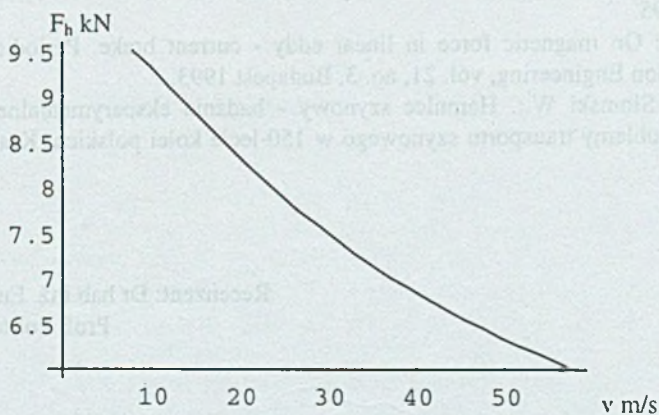
Rys. 3. Składowa pionowa siły ponderomotorycznej

Fig. 3. Vertical component magnetic force



Rys. 4. Siła hamująca wytwarzana przez tarcie płozy o szynę

Fig. 4. Braking force causes by the friction between skid and rail



Rys. 5. Sumaryczna siła hamująca hamulca szynowo-wiroprowadowego

Fig. 5. Total braking force of eddy current brake

Wyniki obliczeń w przedstawiono na rysunkach 2 – 5. Na rys. 2 zamieszczono przebieg składowej poziomej siły ponderomotorycznej obliczonej wg wzoru (2). Kolejno na rys. 3 zilustrowano charakterystykę siły nacisku płozy hamulca na szynę, a na rys. 4 przebieg siły wytwarzanej przez tarcie płozy o szynę w funkcji prędkości. Ostatni rys. 5 zawiera charakterystykę sumarycznej siły hamującej hamulca szynowo-wiroprowadowego.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony w artykule model umożliwia analizę zjawisk elektrodynamicznych występujących podczas pracy hamulca szynowo-wiroprowadowego. W szczególności umożliwia prowadzenie prac projektowych przy budowie hamulca tego typu. Porównując hamulec szynowy z hamulcem hybrydowym należy stwierdzić, że pozwala on na uzyskanie znacznie korzystniejszej charakterystyki hamowania awaryjnego. Wynika to z dodawania się do siebie obu składowych siły hamującej (siły tarcia i składowej poziomej siły ponderomotorycznej pochodzącej od prądów wirowych). Ponadto istnieje możliwość zmiany (w stosunkowo szerokim zakresie) wzajemnej relacji tych sił w celu uzyskania pożądanej charakterystyki hamulca. Zamiana energii hamowania w ciepło odbywa się zarówno na powierzchni płozy hamulca, jak i w warstwie wierzchniej szyny, co pozwala na rozpraszanie większych ilości energii, a tym samym rozwijanie przez hamulec hybrydowy większych mocy hamowania, niż występuje to w przypadku hamulca szynowego. Zakres prędkości, przy których można stosować hamulec szynowo-wiroprowadowy, jest podobny jak dla hamulca szynowego, natomiast wadą tego hamulca jest konieczność dostarczenia znacznie większej niż w przypadku hamulca szynowego mocy do zasilania cewki wzbudnika.

LITERATURA

1. Obara T., Kumagai N.: Development of hybrid rail brake. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.209, 1995.
2. Skowron J.: On magnetic force in linear eddy - current brake. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, vol. 21, no. 3, Budapest 1993.
3. Grajner J, Słomski W.: Hamulec szynowy - badania eksperymentalne i teoretyczne. Wybrane problemy transportu szynowego w 150-lecie kolei polskich. Kraków, Zakopane 1997.

Recenzent: Dr hab.inż. Eugeniusz Kałuża
Prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

In the paper mathematical model of eddy current rail brake is presented and the theoretical characteristic of this brake is determined. Analysis is based on the solutions of the equations describing the magnetic vector potential distribution in the air gap between the brake skid and the rail. This brake causes the brake force resulting from the current and additionally from the brake skid force acting on the rail, the name hybrid brake comes from there.

The comparison between rail and hybrid brake points that the hybrid brake gives the better characteristic in case of emergency braking, especially in the range of high velocities. This results from adding the two components of braking force (friction force and horizontal component of magnetic pulling force coming from eddy currents).

Praca finansowana z projektu badawczego KBN nr 0947/T07/99/16

TECHNICAL POSSIBILITIES FOR ENTER OF HIGH SPEED TRAINS IN POLAND

Summary: In the article we discuss review of existing high speed lines, from the point of view to use outdoor the rolling stock on operating in Poland. Especially there are described traps and along body mechanism. For this kind is possible that with high speed tracks with many curves with small radii. In this way we make 1 built new lines with special geometry.

1. WSTĘP

W ostatnim czasie coraz więcej linii kolejowych jest zamierzonych do modernizacji. W tym celu w sposób szczególny należy zwrócić uwagę na to, jak należy przystąpić do budowy nowych linii kolejowych, szczególnie takich, które mają być wykorzystywane do transportu szybkiego. Charakterystycznym elementem takich linii kolejowych jest to, że są one bardzo kręte, a także, że mają one bardzo małe promienie łuków. W związku z tym, należy zwrócić uwagę na to, jak należy przystąpić do budowy takich linii kolejowych, szczególnie takich, które mają być wykorzystywane do transportu szybkiego. W tym celu w sposób szczególny należy zwrócić uwagę na to, jak należy przystąpić do budowy nowych linii kolejowych, szczególnie takich, które mają być wykorzystywane do transportu szybkiego. W tym celu w sposób szczególny należy zwrócić uwagę na to, jak należy przystąpić do budowy nowych linii kolejowych, szczególnie takich, które mają być wykorzystywane do transportu szybkiego.