

Paweł Piec

NOWE ASPEKTY BADAŃ TRWAŁOŚCI ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Streszczenie. Praca zawiera wyniki symulacji numerycznej zjawisk kontaktowych typu stick-slip między kołem i klockiem hamulcowym pojazdu szynowego. Do opisu ruchu układu o jednym stopniu swobody stosowano równanie różniczkowe zwykle drugiego rzędu. Analizowano wpływ różnych charakterystyk przebiegu wartości współczynnika tarcia na powstawanie korrugacji kół.

NEW ASPECTS OF RESEARCHES OF WHEEL SETS DURABILITY

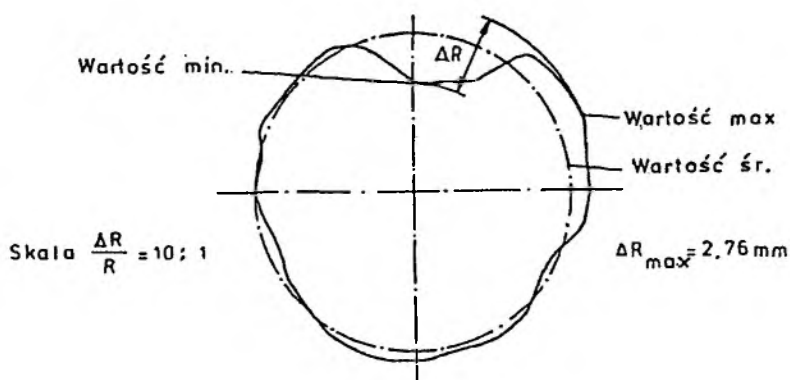
Summary. The paper contains the numerical simulation results of stick-slip contact phenomena between wheel and brake shoe of rail vehicle. To describe system motion with one degree of freedom, accustomed differential equation of second order was used. The effect of different characteristics of process of friction coefficient value on formation of wheel corrugation was analysed.

1. WSTĘP

Trwałość zestawów kołowych jest determinowana w eksploatacji głównie przez intensywność procesów zużycia.

Zestawy kołowe wyposażone w hamulec tarczowy wykazują po określonym czasie eksploatacji owaliację na okręgu tocznym, rys.1. Mimo że przebiegi zestawów kołowych wyposażonych w hamulec tarczowy są większe w porównaniu do zestawów kołowych z hamulcami klockowymi, to jednak ich przebieg w km ograniczony jest przez nierównomierne zużycie koła na obwodzie tocznym. Maksymalna różnica promieni na okręgu tocznym dochodzi do ponad 2 mm. Niespokojny bieg zestawu uzewnętrznia się już dla wartości 1 mm. Powierzchnia toczna przyjmuje kształt wielokąta z wieloma wgłębieniami i wzniesieniami na całym obwodzie.

W miejscu styku koła z klockiem hamulcowym kształtują się podczas hamowania odpowiednie procesy zużycia. Ich zasięg i szybkość rozwoju zależy między innymi od warunków współpracy i własności ciernych materiału, z którego zbudowane są te elementy. W zależności od warunków hamowania na powierzchni cierniej koła tworzy się określony rodzaj zużycia zwanego korrugacją, rys.2.



Rys. 1. Wykres przebiegu owalizacji koła na okręgu tocznym (hamulec tarczowy) [3]
 Fig. 1. The graph of wheel ovality process on the rolling circumference (disc brake)

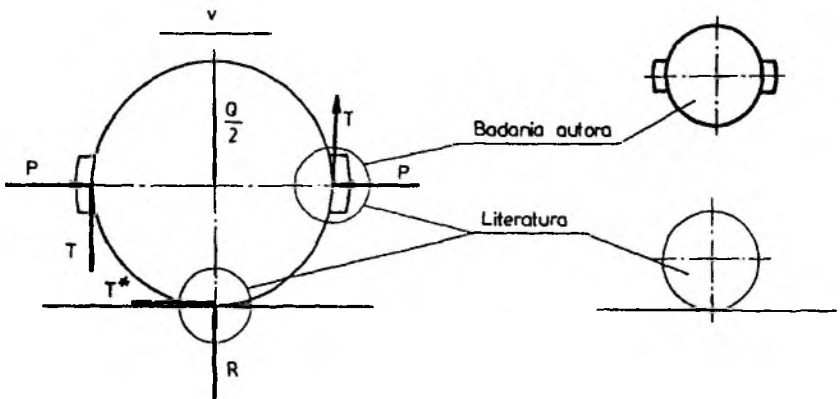


Rys. 2. Obraz zużycia, "korrugacji" na powierzchni ciernej koła (hamulec klockowy) [2]
 Fig. 2. An example of "corrugation" wear on the wheel frictional surface (shoe brake)

Przeprowadzone przez autora pracy liczne obserwacje zmian makropowierzchni cierniej koła zestawów kołowych wagonów wyposażonych w hamulce tarczowe lub klockowe oraz wykonane pomiary tak owalizacji kół (pomiary zestawu zamontowanego w wagonie - Wagonownia w Monachium, pomiary zestawu wymontowanego z wagonu - Zakłady Naprawcze w Weddau), jak i korrugacji kół (Zakłady Naprawcze w Krefeld, Zakłady Naprawcze w Darmstadt, Zakłady Naprawcze w Opladen, Zakłady Naprawcze w Landquart) dały podstawę do stwierdzenia, że wagony wyposażone w hamulec tarczowy wykazują owalizację kół, natomiast wagony wyposażone w hamulec klockowy wykazują korrugację kół, Piec (1981) [1].

Wnioski te znajdują potwierdzenie w pracy Willenbrink (1979) [4]. W pracy tej, poprzez pomiar natężenia emisji dźwięku w pobliżu przejeżdżającego pociągu, charakteryzowany jest wpływ hamulca tarczowego i klockowego na proces rozwoju zjawisk na powierzchni kontaktowej koła. Wagony z hamulcem klockowym emitowały dźwięki o wyższym poziomie natężenia. Zestawy kołowe wagonów z hamulcem klockowym wykazywały korrugację kół.

Dla zrealizowania tych założeń wprowadza się rozprężnięcie układu szyna-koło-kłosek hamulcowy na układ koło-kłosek hamulcowy, rys.3 oraz koło - szyna.



Rys. 3. Ilustracja obszaru prowadzonej analizy rozwoju zjawisk kontaktowych
Fig. 3. Illustration of the area of analysis of contact phenomena development

2. BADANIA SYMULACYJNE KORRUGACJI KÓŁ

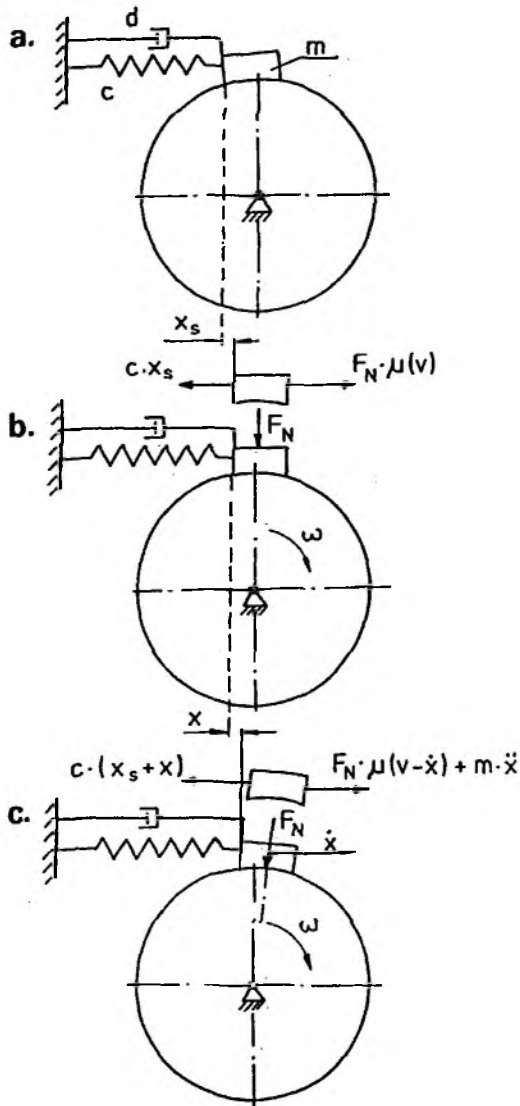
Symulację drgań samowzbudnych przeprowadzono dla układu mechanicznego przedstawionego na rys. 4.

Zakłada się, że ruch translacyjny klocka w analizie badanego układu jest ruchem podstawowym opisywanym równaniem (1). Przyjmuje się, że ruch rotacyjny klocka nie wpływa na ruch badanego układu i w analizie nie jest uwzględniany.

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + c x = \mu F_N \operatorname{sgn}(\dot{x} - v) , \quad (1)$$

gdzie: m - masa ciała, x - wychylenie klocka, d - współczynnik tłumienia, c - stała sprężystości, F_N - siła normalna.

Prędkość liniowa koła v w miejscu styku z klockiem występuje w tym równaniu niejawnie; jest ukryta w wyrażeniu na współczynnik tarcia.



Rys. 4. Schemat analizowanego układu mechanicznego
Fig. 4. The model of investigated system

Podczas hamowania możemy wyróżnić trzy różne formy kontaktu klocka z kołem:

- $\dot{x} = 0, v > 0$ - poślizg klocka bez drgań (rys.4b),
- $\dot{x} \neq 0, v > 0$ - poślizg towarzyszący drganiom (rys.4c),
- $\dot{x} = v, v > 0$ - faza przylegania towarzysząca drganiom typu stick-slip.

Analizę wygodnie jest prowadzić wykorzystując współrzędne bezwymiarowe. Pozwoli to na zmniejszenie liczby parametrów systemu. W tym celu wprowadzono oznaczenie (2):

$$\omega_o = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (2)$$

oraz wybrano dowolną jednostkę siły. Może to być na przykład ciężar ciała F lub siła normalna F_N . Wybór ten pozwoli na unormowanie modeli tarcia.

Wprowadzając do równania (1) następujące wielkości:

- bezwymiarowy czas

$$\tau = \omega_o t, \quad (3)$$

- bezwymiarowe przemieszczenie

$$X = \frac{c x}{F_N}, \quad (4)$$

- bezwymiarowy współczynnik tłumienia

$$\gamma = \frac{d}{2 (c m)^{1/2}}, \quad (5)$$

- bezwymiarową prędkość

$$V = \frac{v (c m)^{1/2}}{F_N}, \quad (6)$$

oraz współczynnik

$$\delta = \frac{F_N \omega_o}{c} \quad \text{czyli} \quad V = \frac{v}{\delta}, \quad (7)$$

- bezwymiarowy współczynnik tarcia

$$\mu \delta (X' - V) = \mu F_N (\dot{x} - v)/F_N, \quad (8)$$

otrzymamy:

$$X'' + 2\gamma X' + X = \mu \delta (X' - V) \operatorname{sgn}(X' - V) \quad (9)$$

Parametrami równania (9) są: $\mu(V_r)$ - model tarcia, γ - bezwymiarowe tłumienie, V - bezwymiarowa prędkość koła. Funkcja $\mu(V_r)$ reprezentuje model tarcia. Rozważane są funkcje $\mu(V_r)$ odpowiadające wytypowanym charakterystykam przebiegu wartości współczynnika tarcia.

Przygotowany program numeryczny wyznacza przybliżone rozwiązanie równania różniczkowego (1), opisującego ruch klocka względem koła podczas hamowania, przy zadanych warunkach początkowych.

Przedmiotem analizy numerycznej są samowzбудne drgania klocka hamulcowego. Podstawą badań jest zależność amplitudy i częstotliwości powstających drgań klocka hamulcowego oraz czasu trwania fazy stick (przylegania) klocka do koła podczas hamowania od prędkości względnej koła i warunków początkowych hamowania.

Dane wejściowe do programu obliczeń to:

1. Charakterystyki przebiegu wartości współczynnika tarcia, reprezentujące przyjęte modele tarcia zapisane w postaci równania.
2. Parametry badanego układu mechanicznego hamulca pojazdu szynowego.

Charakterystyki z pktu 2 mogą być odpowiednio modyfikowane przez dobór współczynników tarcia kinetycznego i statycznego oraz parametrów tarcia.

Parametry z pktu 2 mogą być podawane we współrzędnych bezwymiarowych lub wymiarowych.

Parametrami analizowanego układu mechanicznego we współrzędnych bezwymiarowych są:

- V - prędkość koła,
- γ - współczynnik tłumienia,
- X'_o - prędkość początkowa klocka,
- X_o - wychylenie początkowe klocka,
- δ - współczynnik przeliczeniowy.

Parametrami analizowanego układu mechanicznego we współrzędnych wymiarowych są:

- v - prędkość koła [m/s],
- m - masa skupiona klocka [kg],
- c - stała sprężystości [N/m],
- d - współczynnik tłumienia [N s/m],
- \dot{x}_o - prędkość początkowa klocka [m/s],
- x_o - wychylenie początkowe klocka [m],
- F_N - siła docisku klocka do koła [N].

Parametry analizowanego układu mechanicznego mogą być zadane do obliczeń jako stałe lub wybrany parametr może być zadeklarowany jako zmienny z podaniem kroku obliczeń.

Po zakończeniu obliczeń wyniki analizy, między innymi, mogą być wyświetlane na monitorze ekranu w formie wykresu fazowego lub amplitudowo-częstotliwościowego.

3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W zależności od przyjętego modelu tarcia i warunków początkowych analizowany układ mechaniczny wykazuje drgania samowzбудne typu stick-slip lub typu slip bez występowania fazy stick. Wartość amplitudy tych drgań zależy również od przyjętego modelu tarcia i warunków początkowych.

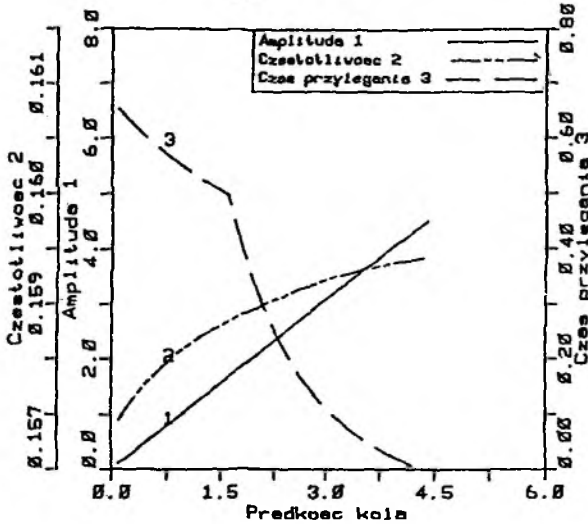
Jeżeli współczynnik tarcia odpowiada modelowi:

$$" \mu_s > \mu_k; \quad \mu_k = f(v) ",$$

to badany układ wykazuje podczas ruchu powstawanie samowzбудnych drgań typu stick-slip o ustalonym cyklu granicznym (rys.5, krzywa 3).

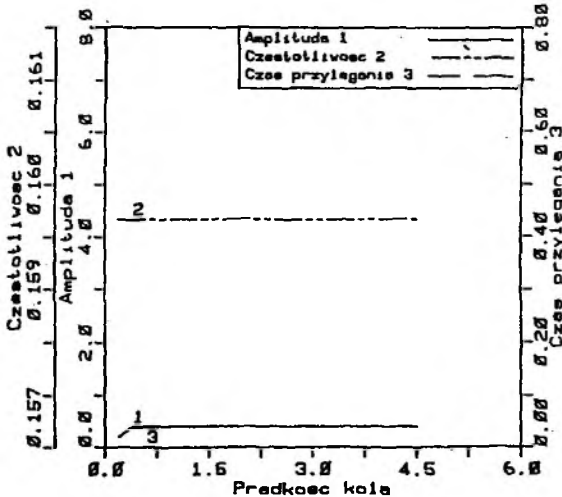
Całkowite wyeliminowanie drgań samowzbudnych typu stick-slip osiąga się przez wprowadzenie do równania (1) modelu tarcia:

$$\mu_k = \mu_k; \quad \mu_k = \text{const}$$



Rys. 5. Wykresy amplitudy i częstotliwości drgań klocka oraz czasu trwania fazy stick:
 $V = 0,01 + 4,5; X'_0 = 0; \gamma = 0; \delta = 1$

Fig. 5. Amplitude, frequency of the brake-shoe vibrations and stick time



Rys. 6. Wykresy amplitudy i częstotliwości drgań klocka oraz czasu trwania fazy stick:
 $V = 0,01 + 4,5; X'_0 = 0; \gamma = 0; \delta = 1$

Fig. 6. Amplitude, frequency of the brake-shoe vibrations and stick time

Dla tego modelu tarcia występują tylko drgania typu slip o bardzo małej wartości amplitudy drgań. Drgania typu stick nie występują (rys.5, krzywa 3).

Charakterystyczną cechą stosowania pierwszego modelu tarcia jest to, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej koła zwiększa się wartość amplitudy drgań, przy czym częstotliwość drgań dąży do wartości ustabilizowanej. Przy dalszym wzroście prędkości koła drgania samowzbudne typu stick-slip zanikają, pozostaje tylko faza slip. Powyżej określonej prędkości koła drgania samowzbudne typu slip nie występują. Układ nie ulega wzbudzeniu.

4. ZAKOŃCZENIE

Występowanie fazy stick w procesie hamowania, to jest fazy przylegania klocka do koła bez poślizgu, zwiększa prawdopodobieństwo adhezji materiału wstawki hamulcowej z materiałem koła, co odpowiada zwiększonemu prawdopodobieństwu powstawania korrugacji koła.

Przeprowadzone badania wykazały, że można stymulować rozwój zjawisk kontaktowych związanych z tarciem typu stick-slip w miejscu styku koła z klockiem hamulcowym pojazdu szynowego. Na rozwój tych zjawisk można oddziaływać poprzez właściwy dobór materiału wstawki klocka hamulcowego, charakteryzującego się odpowiednią charakterystyką przebiegu wartości współczynnika tarcia.

Literatura

- [1] Piec P.: Schwingungstechnische Untersuchung der Bremsvorgaenge - Analyseergebnisse. 2. Bericht ueber die Voruntersuchungen fuer Humboldt-Stiftung, RWTH Aachen 1981, s.1-195.
- [2] Piec P.: Zużycie faliste powierzchni tocznej kół pojazdów szynowych. Trakcja i Wagony, nr 11, 1983, s.305-307.
- [3] Piec P.: Mechanizm powstawania zużycia falistego kół tocznych wagonów w warunkach hamowania klockowego oraz sposoby przeciwdziałania. Monografia 71, Politechnika Krakowska, Kraków 1988, s.1-130.
- [4] Willenbrink L.: Neuer Erkenntnisse zur Schalabstrahlung von Schienenfahrzeuge. Eisenbahntechnische Rundschau, 5 (1979).

Recenzent: dr hab. inż. prof. Pol. Śl. Piotr Adamiec

Wpłynęło do redakcji: 10.07.1995 r.

Abstract

The conception of analysis of stick-slip contact phenomena presented in the paper, on the example of brake-shoe used in rail vehicles, allows to solve problems of effect of materials properties of frictional elements on the process development of self-excited vibrations. The materials with different characteristics of friction coefficient value were analysed.

In the paper, the question of numerical simulation of stick-slip self-excited vibrations, arisen during friction, was considered. For the accepted mathematical model the influence of friction coefficient on behaviour of brake system was analysed. The friction coefficient characteristics and the conditions of the braking process during which the stick-slip self-excited vibrations do not arise, were stated.

The numerical simulation results of stick-slip self-excited vibrations showed the correspondency to the whole of results of experimental researches and operational tests. The complex formulation of the problem allows to carry out the detailed identificational analysis of researches results and gives the full picture of studied phenomena.