

Anna KUMANIECKA
Instytut Matematyki, Politechnika Krakowska

BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU LINA ZASILAJĄCA-PANTOGRAF

Streszczenie. Praca zawiera przegląd metod stosowanych w zagadnieniach dotyczących modelowania dynamicznej współpracy układu lina zasilająca-pantograf. Celem pracy jest sformułowanie matematycznego opisu układu zasilania kolejowej trakcji elektrycznej uwzględniającego występujące tu zjawiska fizyczne. Analiza dotyczy sprzężonych drgań podłużno-poprzecznych. Ruch układu opisany został układem nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych. Rozwiązanie otrzymano stosując transformacje całkowite Laplace'a i Fouriera oraz numerycznie.

SIMULATION OF CATENARY-PANTOGRAPH SYSTEM

Summary. The paper gives an overview of the methods of modelling the dynamic behaviour of the catenary and pantograph systems. The aim of the present paper is mathematical description of railway overhead contact system outlining the significance of different physical effects occurring during operation. The coupled longitudinal and transversal vibrations are considered. The dynamic state of the system is described by a non-linear set of coupled partial differential equations. The solution was obtained by means of integral transforms and numerically.

1. WSTĘP

Badania układów zasilania elektrycznego pojazdów szynowych są przedmiotem zainteresowania szeregu wiodących ośrodków naukowych na świecie, m.in. w USA, RFN, Japonii, Francji, Szwecji i innych. Proponowane metody analiz teoretycznych i doświadczalnych bazują na współczesnych osiągnięciach matematyki i informatyki oraz teorii badań symulacyjnych.

Dążenie do zwiększenia prędkości pociągów pasażerskich i towarowych jest jedną z cech rozwojowych kolei, mającą swe uzasadnienie gospodarcze i społeczne. Rozwój ten, oparty głównie na trakcji elektrycznej, wymaga stałego doskonalenia środków technicznych związanych z dynamiką ruchu pojazdu.

Współczesne układy zasilania w kolejowej trakcji elektrycznej powinny spełniać swoją funkcję niezawodnie, przy różnych oddziaływaniach zewnętrznych, w warunkach wzrastających wymagań odnoszących się do dużych prędkości przewozów. Potrzeba modyfikacji istniejących systemów lina-pantograf pociąga za sobą konieczność rozwiązania szeregu problemów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Możliwość analizy wpływu różnych cech i modyfikacji konstrukcyjnych na zachowania dynamiczne układu, bez konieczności angażowania nadmiernych środków finansowych na długotrwałe badania wielu fizycznych układów prototypowych, stanowi o ekonomicznej atrakcyjności badań teoretycznych i symulacyjnych. Z drugiej strony modele teoretyczne wspomagane weryfikacjami doświadczalnymi pozwalają na dokładną identyfikację powstających zjawisk.

W pracy rozważane są zagadnienia związane z identyfikacją i symulacją zjawisk zachodzących w układach zasilania kolejowej trakcji elektrycznej, w szczególności efektów dynamicznych pojawiających się w czasie współpracy linii zasilającej z pantografem.

Praca daje przegląd metod dotyczących opisu dynamicznej współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.

2. PROBLEMY WSPÓŁPRACY ODBIERAKA PRĄDU Z SIECIĄ TRAKCYJNĄ

2.1. Uwagi wstępne

W rozwiązaniach konwencjonalnych zasilanie pojazdu trakcyjnego w energię elektryczną odbywa się z napowietrznej sieci trakcyjnej, a elementem pośredniczącym w odbiorze energii elektrycznej jest pantograf. Sieć trakcyjna jest układem mechanicznym o przestrzennie rozłożonych parametrach, odbierak prądu natomiast jest układem ruchomym o skupionych parametrach, przemieszczającym się wzdłuż sieci trakcyjnej.

Dla realizacji szybkiego ruchu pociągów transmisja energii elektrycznej jest szczególnie ważna. Shinkansen, osiągający prędkość 330 km/h, wymaga 16 000 kW, Euro-star, jadący z prędkością 300 km/h, wymaga 14 000 kW mocy. Dla tych szybkich pojazdów szynowych zasilanie w energię elektryczną musi mieć następujące parametry: 600-1000 A przy 25 kV AC. Jest więc oczywiste, że jakość współpracy dynamicznej między siecią a pantografem jest istotnym problemem w czasie ruchu szybkich pociągów.

Nieprawidłowa współpraca pantografu z siecią trakcyjną może być przyczyną przerw w zasilaniu pojazdu trakcyjnego, znacznego zużycia materiałów stykowych, zakłóceń radioelektrycznych, a także uszkodzeń zarówno sieci trakcyjnej, jak i pantografu.

Jakość odbioru prądu uzależniona jest od warunków pracy zestyku ślizgowego, jaki tworzą wkładki ślizgacza odbieraka prądu oraz drut jezdny sieci trakcyjnej. Warunki pracy zestyku pantograf-sieć uzależnione są od parametrów odbieranego prądu, prędkości jazdy oraz innych czynników. Prawidłowy odbiór prądu zapewniony jest wówczas, gdy między ślizgaczem pantografu a drutem jezdny istnieje styk mechaniczny. Podstawową wielkością określającą jakość tego styku jest siła oddziaływania między ślizgaczem odbieraka prądu a drutem jezdny sieci trakcyjnej (siła stykowa). Siła ta ma składowe statyczną i dynamiczną zależną od prędkości ruchu pociągu i drgań układu lina-pantograf. Zerowa wartość siły stykowej jest przyczyną przerw w zasilaniu pojazdu trakcyjnego, zbyt duża natomiast wartość siły stykowej jest powodem przedwczesnego zużycia drutów jezdnych oraz wkładek ślizgacza.

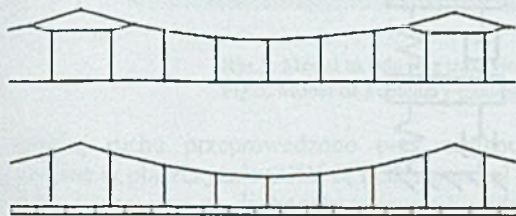
Sposobem zapewniającym dobrą jakość współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest stabilizacja siły stykowej, która może być dokonana przez odpowiedni dobór parametrów dynamicznych obu układów. Normy techniczne przyjęte w wielu krajach stanowią, że utrata kontaktu między liną zasilającą a pantografem powinna być mniejsza niż 1% przy średniej prędkości pociągu. Jednakże zgodnie ze ścisłymi obecnie żądaniem dotyczącymi trakcji elektrycznej utrata kontaktu powinna być ograniczona do minimum.

W warunkach polskich, gdzie duży procent pojazdów trakcyjnych korzysta z energii elektrycznej pobieranej z sieci trakcyjnej, problem zapewnienia prawidłowej współpracy pantografu z siecią pozostaje ciągle otwarty. Zagadnienie powyższe odgrywa istotną rolę na PKP.

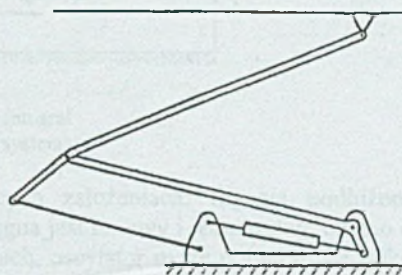
2.2. Dynamika sieci trakcyjnej

Mimo że sieć trakcyjna i pantograf tworzą układ dynamiczny wzajemnie sprzężony, to przedmiotem wielu prac jest problem modelowania i symulacji tylko sieci.

Obecnie dwie podstawowe konfiguracje sieci trakcyjnej przedstawione schematycznie na rysunku 1 są stosowane na liniach szybkiego ruchu.



Rys.1. Rodzaje sieci trakcyjnej
Fig.1. Catenary systems



Rys.2. Schemat pantografu
Fig. 2. Scheme of pantograph

Najczęściej przyjmowanym modelem fizycznym sieci jest model struny opisujący sieć jako jednorodną, nieskończoną, napiętą cięgno oddziałującą z otoczeniem poprzez gęsto, równomiernie rozłożone tłumiki [1]. Tak przyjęty model pozwala na otrzymanie analitycznego rozwiązania równania różniczkowego cząstkowego, o ile tłumienie wewnętrzne w układzie jest małe (w rzeczywistych systemach wynosi ono od 0,3% do 1% krytycznego) i stała jest prędkość propagacji fali sprężystej w strunie. Równanie ruchu ma wtedy następującą postać:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial w}{\partial t} + q(x, t) = 0, \quad (1)$$

gdzie: $w(x, t)$ – poprzeczne przemieszczenia cięgna, ρ – liniowa gęstość masy cięgna, A – przekrój poprzeczny, N – siła naciągu cięgna, β – współczynnik lepkości, $q(x, t)$ – obciążenie.

Oprócz modelu struny przyjmuje się też model belki dla uwzględnienia sztywności giętej sieci trakcyjnej (belka Eulera – Bernoulliego) [2] opisany równaniem:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial w}{\partial t} + q(x, t) = 0, \quad (2)$$

gdzie: EI sztywność gięta belki.

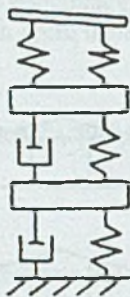
Uwzględnienie sztywności giętej jest istotne w obszarze kontaktu liny i pantografu [2] szczególnie dla wysokich częstotliwości oddziaływania układów.

W badaniach symulacyjnych liny trakcyjnej stosuje się wiele metod numerycznych: analizę modalną, metodę falową d'Alemberta i metodę elementów skończonych i brzegowych. Analizę i ocenę tych metod zawiera praca [2].

2.3. Dynamika pantografu

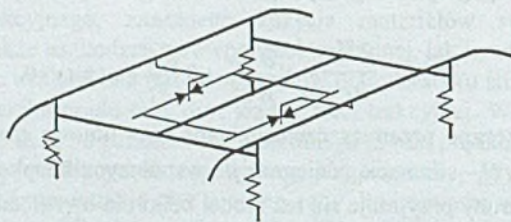
Schemat konstrukcji pantografu przedstawia rysunek 2. Dynamiczne własności odbieraka prądu określone są przez następujące parametry: masa, siła statyczna, składowa aerodynamiczna, sztywność sprężynowania ślizgacza, współczynnik tarcia lepkiego, siła tarcia suchego, siła elektrodynamiczna.

Jako model fizyczny pantografu przyjmuje się oscylator–masę skupioną (lub dwie) połączoną z ciągnem i otoczeniem elementami lepko-sprężystymi i oddziałującą z ciągnem jedno- lub dwupunktowo [2].



Rys.3. Model pantografu o dwu stopniach swobody
Fig.3. Model of pantograph with two degree of freedom

Obecnie przedmiotem wielu prac są badania dotyczące konfiguracji aktywnie sterujących konstrukcji pantografu. Hydrauliczne elementy sterujące zostały np. zastosowane przez Sikorsky Aircraft Company w pantografach typu August Stemman. Badania symulacyjne udowodniły, że te aktywne elementy potencjalnie polepszyły dynamiczną współpracę układu. Naukowcy z Uniwersytetu w Sheffield zaprojektowali pantograf z dwoma piezoelektrycznymi elementami sterującymi umieszczonymi między wkładkami ślizgacza (rys.4).

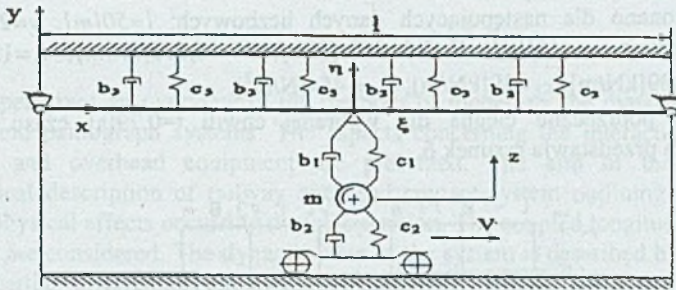


Rys.4. Model pantografu z elementami sterującymi
Fig.4. Model of pantograph with actuator devices

2.4. Dynamika układu lina trakcyjna - pantograf

Model fizyczny przyjęty do rozważań obrazuje oddziaływanie układu ciągłego złożonego ze skończonego napiętego cięgna oddziałującego z otoczeniem poprzez gęsto, równomiernie rozłożone tłumiki, w którym rozchodzą się fale biegnące oraz z oscylatora (masy skupionej połączonej z cięgnem i otoczeniem elementami lepko-sprężystymi) wykonującego drgania i ruch posuwisty.

Schemat układu dla przypadku jednopunktowego oddziaływania oscylatora z cięgnem ilustruje rysunek 5.



Rys.5. Model układu lina trakcyjna-pantograf
Fig.5. Model of a catenary-pantograf system

Analizę ruchu przeprowadzono przy następujących założeniach: drgania podłużno-poprzeczne w płaszczyźnie OXY są małe, materiał cięgna jest liniowy i jednorodny, cięgno o długości l spoczywa na doskonale sztywnych podporach, oscylator może poruszać się tylko wzdłuż osi OX ze stałą prędkością v , masa lepko-sprężystych elementów łączących jest pomijalnie mała, w niezaburzonym ruchu względnym cięgna i masy oscylatora istnieje napięcie w elementach łączących, istnieje siła tarcia T w punkcie oddziaływania oscylatora z cięgnem i jej wartość jest proporcjonalna do siły oddziaływania cięgna i oscylatora, nie ma utraty kontaktu między cięgnem i oscylatorem, nie uwzględnia się oddziaływań grawitacyjnych.

Ruch układu opisany jest złożonym układem dwóch równań różniczkowych cząstkowych (3).

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] = X(x,t),$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[N(x,t) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + b_3 \frac{\partial w}{\partial t} + c_3 w = 0, \quad (3)$$

gdzie: $u(x,t)$, $w(x,t)$ wzdłużne i poprzeczne przemieszczenia cięgna, ρ – liniowa gęstość masy cięgna, E – moduł Younga, A – przekrój poprzeczny, $X(x,t)$ – obciążenie ruchome wywołane siłą tarcia, $N(x,t)$ – siła naciągu cięgna, b_3 , c_3 – współczynnik lepkości i stała sprężysta elementu łączącego cięgno z otoczeniem.

Warunki początkowe i brzegowe przyjęto jednorodne.

Relację pomiędzy przemieszczeniem masy oscylatora $z(t)$ oraz punktem styku z cięgnem opisuje równanie różniczkowe (4).

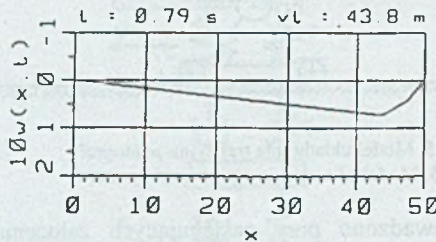
$$m\ddot{z} + (b_1 + b_2)\dot{z} + (c_1 + c_2)z = c_1 w(x, t)|_{x=vt} + b_1 \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \Big|_{x=vt}, \quad (4)$$

gdzie: m masa oscylatora, b_1, c_1, b_2, c_2 - współczynniki lepkości i stałe sprężyste elementu łączącego ciężno z masą oscylatora i masę oscylatora z otoczeniem.

Stosując transformacje całkowe Laplace'a i Fouriera otrzymano rozwiązanie równania drgań podłużnych. Pozwoliło to na wyznaczenie siły wzdłużnej w ciężnie sprzęgającej równania drgań wzdłużnych i poprzecznych. Kierując się wykorzystaniem rezultatów w kolejnictwie ograniczono rozważania do względnie małych prędkości v ruchu oscylatora wynoszących 0,8 prędkości sprężystych fal poprzecznych w ciężnie. Równanie drgań poprzecznych rozwiązano numerycznie.

Obliczenia wykonano dla następujących danych liczbowych: $l=50[m]$, $v=200[km/h]$, $a=1,2v$, $\rho=1,45[kg/m]$, $m=15[kg]$, $E=2,1 \cdot 10^8 [kPa]$, $N=0,015[kN/m]$, $b_1=120[Ns/m]$, $b_2=30[Ns/m]$, $c_1=39[kN/m]$, $c_2=39[kN/m]$, $c_3=1454[N/m^2]$.

Przemieszczenia poprzeczne ciężna dla wybranej chwili $t=0,79[s]$ czasu pełnego przejazdu oscylatora przedstawia rysunek 6.



Rys.6. Przemieszczenia poprzeczne ciężna
Fig.6. Catenary transversal displacements

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Problem teoretyczny rozważany w pracy wywodzi się z grupy problemów technicznych, w których decydującą rolę odgrywa zagadnienie dynamiki układów jednowymiarowych pod obciążeniem ruchomym. Modelowanie układu lina zasilająca-pantograf jest problemem związanym z ruchem dwóch sprzężonych ze sobą podukładów: podukładu ciągłego (lina trakcyjna) i podukładu dyskretnego. Wydaje się, że rezultaty uzyskane dla względnie prostego modelu pozostaną jakościowo słuszne dla bardziej złożonych układów.

LITERATURA

1. Kumaniecka A.: Longitudinal and transversal vibration of railway overhead contact system, Machine Dynamics Problems, vol.20, 1998, s. 181-192.

2. Poetsch, G., Evans, J., Meisinger, R., Kortum, W., Baldauf, W., Veitl, A., Wallaschek, J.: Pantograph/ Catenary Dynamics and Control, Vehicle System Dynamics 28, 1997, s. 159-195.

Abstract

The paper gives an overview of the methods of modelling the dynamic behaviour of the catenary and pantograph systems. The aspects concerning the interaction between current collectors and overhead equipment are presented. The aim of the present paper is mathematical description of railway overhead contact system outlining the significance of different physical effects occurring during operation. The coupled longitudinal and transversal vibrations are considered. The dynamic state of the system is described by a non-linear set of coupled partial differential equations. The solution was obtained by means of integral transforms and numerically. General results are illustrated by a numerical example.

Praca finansowana częściowo z projektu KBN nr 0947/T07/99/16.