

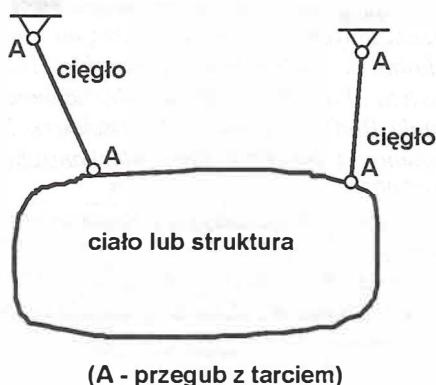
Nowy sposób identyfikacji modeli układów wieszakowych z tarciem

W artykule przedstawiono nowy sposób identyfikacji parametrycznej modeli układów wieszakowych z tarciem suchym. W tym celu opracowano nową metodę pomiarową wyznaczania zbioru pętli histerezy takich układów. Pętle są wyznaczane w warunkach drgań swobodnych bez interakcji oprzyrządowania pomiarowego. Parametry inercyjne oraz geometria układu nie muszą być znane. Jeśli znana jest struktura modelu to identyfikacja jego parametrów jest prowadzona na zbiorze pętli histerezy. Układy wieszakowe stosowane w technice to głównie zawieszenia pojazdów szynowych.

1. Wstęp

Układ wieszakowy składa się z ciała lub struktury zawieszanej na cięgłach (wieszakach) zakończonych przegubami. Elementy przegubu mogą toczyć się po sobie lub ślizgać. Gdy ciało zostanie wychylone z położenia równowagi statycznej to działanie zwrotne układu cięgł w polu sił ciężkości spowoduje ruch powrotny ciała. Jeśli przemieszczenie początkowe jest duże to ruch powrotny jest tłumiony dzięki dyssypacji energii przez tarcie w przegubach. Elementy przegubu ślizgają się po sobie. Gdy przemieszczenia stają się dostatecznie małe to dyssypacja energii praktycznie nie zachodzi, gdyż elementy przegubów toczą się po sobie.

Schemat układu wieszakowego pokazano na rys. 1.



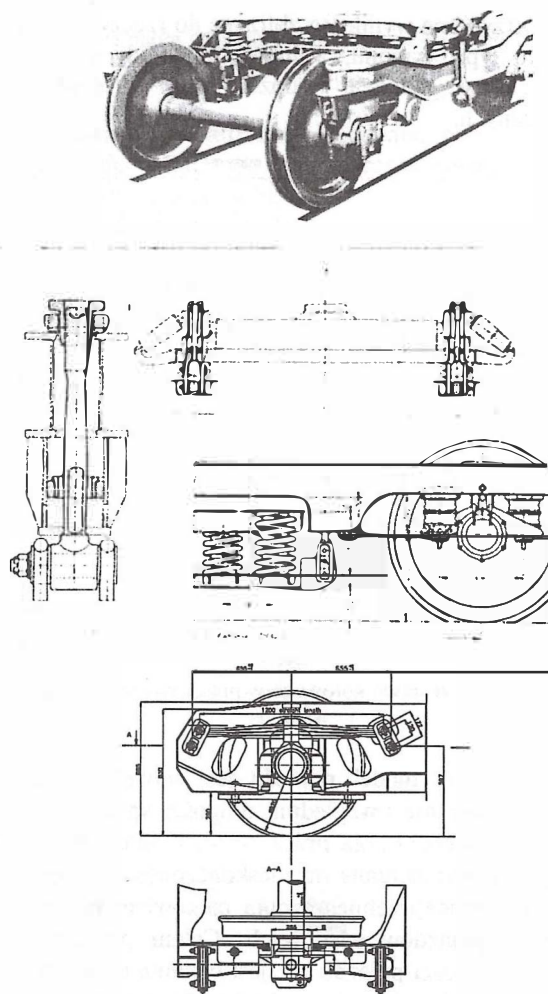
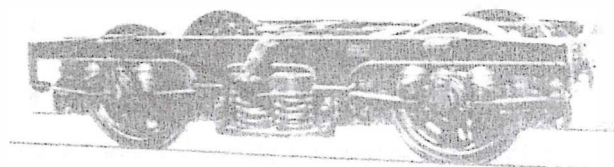
Rys. 1 Schemat układu wieszakowego

Układy wieszakowe stosowane w technice są układami złożonymi z punktu widzenia mechaniki. Posiadają one skomplikowaną geometrię, szczególnie wówczas, gdy elementy toczno-ślizgowe przegubów są zużyte. Zaliczane są one do układów nieliniowych ze względu na tarcie, którego opis wymaga użycia metod mechaniki nieliniowej [1].

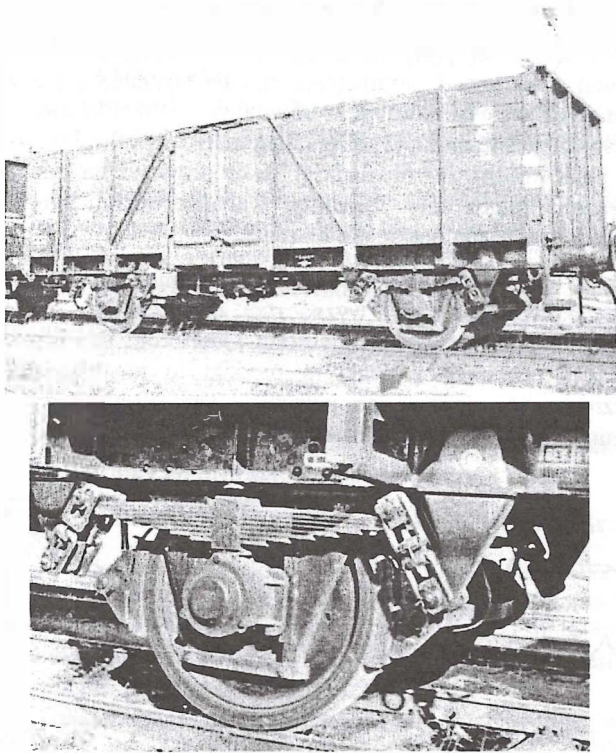
Układy wieszakowe są powszechnie stosowane w technice kolejowej jako zawieszenia pojazdów. Mają one postać łańcuchów kinematycznych utworzonych przez elementy sprężyste i wieszaki. Niektóre stosowane układy zawiesznień typu wieszakowego wózków pokazano na rys. 2.

Na rys. 3 przedstawiono standardowe zawieszenie UIC typu wieszakowego, stosowane w dwuosioowych wagonach towarowych. Zawieszenie to znalazło zastosowanie w znacznej liczbie wagonów eksploatowanych w Europie Zachodniej.

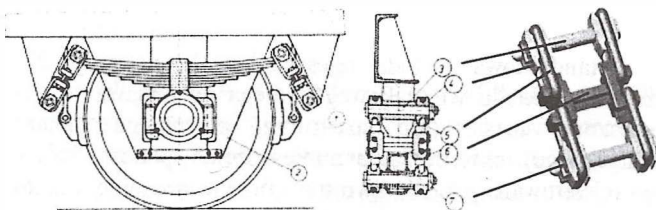
Zawieszenie UIC składa się z resorów piórowych i elementów tworzących wahadła techniczne [2] wchodzące w łańcuchy kinematyczne wiążące ramę wagonu z korpusami łożysk osiowych. Poszczególne elementy są lepiej widoczne na rys. 4.



Rys. 2 Układy wieszakowe stosowane w wózkach



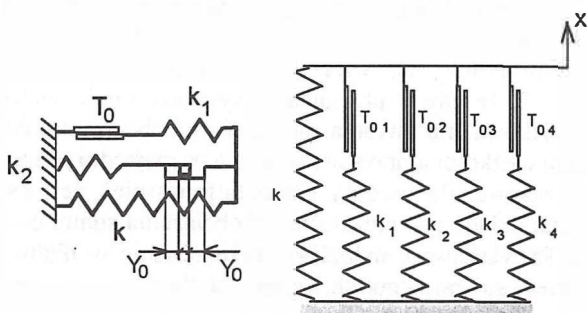
Rys. 3 Standardowe zawieszenie UIC typu wieszakowego



Rys. 4 Elementy standardowego zawieszenia UIC typu wieszakowego: 1-wspornik, 2-widły maźnicze, 3-sworzeń, 4-kamień, 5-wieszak, 6-jarzmo, 7-ucho z zawleczką

Model zawieszenia UIC z przegubami o nominalnie cylindrycznych elementach został opracowany przez autora [1]. Podstawowym założeniem było przyjęcie prawa Coulomb'a tarcia suchego do opisu współpracy elementów przegubów.

Fenomenologiczny model opisujący działanie zawieszenia w kierunku poprzecznym do osi toru ma postać prostego elementu podatnego z tarcieniem suchym, pokazanego na rys. 5a. Działanie zawieszenia w kierunku wzdłużnym opisuje model w postaci złożonego elementu sprężystego z tarcieniem suchym, pokazany na rys. 5b.



Rys. 5 Modele zawieszenia UIC. a- kierunek poprzeczny, b- kierunek wzdłużny

Modele składają się ze sprężyn liniowych i suwaków tarcia suchego. Siłę zerwania suwaka tarcia suchego oznaczono przez T_0 i T_{0i} . Charakterystykę suwaka zgodną z prawem Coulomb'a tarcia suchego, jako elementu niegładkiego, opisano matematycznie w pracy [1].

Model dla kierunku poprzecznego uwzględnia ogranicznik, unieruchamiający dolne wieszaki po przekroczeniu przez zestaw kół przemieszczenia o wartości $Y_0 = 0.02m$ względem ramy.

Eksperymentalną weryfikację elementów modelu zawieszenia opisano w pracy [2]. Weryfikacja polegała na rejestracji przebiegów czasowych wychyleń wahadła technicznego i wyznaczaniu częstości odpowiadających tocznieniu i ślizganiu się elementów przegubu po sobie. Odrębnie wyznaczone parametry inercyjne umożliwiły wyznaczenie parametrów modelu k , k_1 , T_0 . Wyniki weryfikacji wykazały, że założenie prawa tarcia Coulomb'a jest uzasadnione a parametry modelu wyznaczone na podstawie pomiarów są bardzo bliskie co do wartości liczbowych obliczonym podczas modelowania.

Identyfikacja parametrów całego zawieszenia, prowadzona metodą opisaną w pracy [2] jest utrudniona ze względu na silne tłumienie drgań przez tarcie. W zakresie takich wychyleń, że dominuje ślizganie w przegubach, układ wykonuje około półtora okresu drgań swobodnych, w związku z czym trudno jest wyznaczyć częstość odnoszącą się do ślizgania. Ponadto, należy znać parametry inercyjne układu oraz geometrię elementów przegubów. W pracy [4] opracowano optyczną metodę pomiarów geometrycznych elementów przegubów, której wyniki mogą być zastosowane w metodzie [2] w odniesieniu do rozszerzonego matematycznego modelu zawieszenia. Parametry inercyjne elementów zawieszenia można wyznaczyć odrębnie, lecz jest to bardzo pracochłonne zadanie.

Mając na uwadze te okoliczności opracowano nowy sposób identyfikacji parametrów modelu zawieszenia, który pozbawiony jest niedogodności metody zastosowanej w pracy [2].

Nowy sposób polega na rejestracji zbioru pętli histerezy jednostkowej siły zwrotnej w funkcji przemieszczenia podczas drgań swobodnych układu wieszakowego i wyznaczeniu parametrów modelu na podstawie zarejestrowanej pętli histerezy. Podczas drgań swobodnych nie występuje żadne oddziaływanie oprzyrządowania pomiarowego na układ.

2. Warunki toczenia i ślizgania się elementów przegubu

Celem rozważań jest wykazanie, że w przypadku stosowności prawa Coulomb'a tarcia suchego warunki toczenia i ślizgania nie zależą od obciążenia przegubu. Umożliwia to wprowadzenie pojęcia jednostkowej siły zwrotnej układu wieszakowego. Koncepcja siły jednostkowej prowadzi wprost do nowej metody wyznaczania zbioru pętli histerezy.

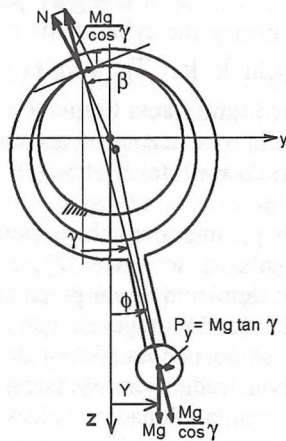
Rozpatrzono wahadło techniczne z nieruchomym sworzniem o dowolnych profilach sworznia i tulei. Oznaczono kąt styku tulei i sworznia przez β . W przypadku cylindrycznych elementów obowiązuje następujące równanie, opisujące więź geometryczny podczas toczenia:

$$\beta = \frac{R}{R-r} \Phi, \quad (1)$$

gdzie: R – promień tulei, r – promień sworznia.

Równanie to wprowadzono pomijając mikroślizg podczas toczenia. W pracy [3] wykazano, że pominięcie zjawiska mikroślizgu prowadzi do marginalnych błędów. Dzieje się tak dlatego, że droga toczenia w przegubie jest bardzo krótka, rzędu 0.01m.

Aby wahadło mogło pozostawać w wychylnym położeniu jak na rys. 6, na masę M należy działać siłą poprzeczną równą $P_y = Mg \tan \gamma$. Wypadkowa siła działająca na masę wynosi $Mg / \cos \gamma$.



Rys. 6 Schemat wahadła technicznego

W stanie równowagi, wypadkowa siła i jej reakcja w punkcie styku tulei i sworznia są współliniowe i przeciwnie skierowane.

Rozkładając reakcję na kierunki styczny i normalny w punkcie styku otrzymujemy siłę normalną N i styczną T , działające w punkcie styku na tuleję

$$N = \frac{Mg}{\cos \gamma} \cos(\beta - \gamma), \quad T = \frac{Mg}{\cos \gamma} \sin(\beta - \gamma). \quad (2)$$

Zgodnie z prawem Coulomb'a, nie dochodzi do ślizgania, gdy

$$\frac{T}{N} < f, \quad \text{lub} \quad \tan(\beta - \gamma) < f. \quad (3)$$

Przy spełnieniu powyższego warunku tuleja toczy się po sworzniu. Gdy zachodzi ślizganie to

$$\frac{T}{N} = f, \quad \text{lub} \quad \tan(\beta - \gamma) = f. \quad (4)$$

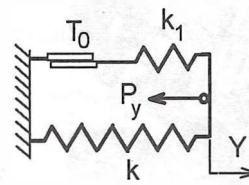
Warunki toczenia i ślizgania nie zależą od obciążenia przegubu. W związku z tym siły mogą być rozpatrywane jako wielkości jednostkowe, odniesione do obciążenia Mg .

Jednostkowa siła zwrotna to $P_y / (Mg) = \tan \gamma$. Załóżmy, że jednostkowa siła pomnożona przez przyspieszenie ziemskie g to poziome przyspieszenie masy M .

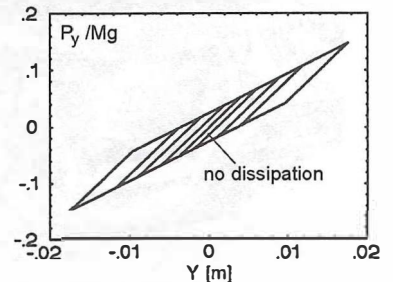
3. Pętla histerezy układu wieszakowego

Teoretyczną pętlę histerezy siły zwrotnej układu o znanej strukturze i parametrach można wyznaczyć przez numeryczne całkowanie równania różniczkowego opisującego siłę tarcia [1]. Opis matematyczny odwołuje się do pojęć mechaniki niegładkiej. Jako przykład na rys. 8 pokazano pętlę siły zwrotnej wahadła technicznego, którego model ma postać jak na rys.7.

Znając strukturę i parametry modelu układu wieszakowego można wyznaczyć obliczeniowo pętlę histerezy jednostkowej siły zwrotnej. Odwrotnie, gdy znane są pętle histerezy i struktura modelu to możliwe jest wyznaczenie jego parametrów. Ta czynność to identyfikacja parametryczna modelu.



Rys.7 Model wahadła technicznego



Rys.8 Pętla histerezy jednostkowej siły zwrotnej

Standardowa metoda rejestracji pętli histerezy siły zwrotnej układu wieszakowego polega na nadawaniu zawieszonym masie (lub strukturze) powolnego (quasi-statycznego), okresowego przemieszczenia, podczas którego rejestrowana jest siła zwrotna i przemieszczenie. Zaletą metody jest to, że nie ma potrzeby wyznaczania parametrów inercyjnych układu, których uzyskanie jest pracochłonne i stwarza dodatkowe trudności pomiarowe. Wada metody polega na tym, że prędkości ślizgania w przegubach są nierealistycznie niskie. Jak wiadomo, siła tarcia zależy od prędkości ślizgania. Układy wieszakowe stosowane jako zawieszenia pojazdów szynowych podlegają podczas pracy drganiom z dominującą częstością własną, co doprowadza do pojawienia się skończonych prędkości ślizgania.

Innym sposobem rejestracji jest wywołanie okresowych przemieszczeń układu zadaną częstością i pomiar siły oraz przemieszczenia. W tej metodzie należy znać parametry inercyjne układu. Metoda ta nadaje się do prostych układów, których parametry inercyjne są łatwe do wyznaczenia. Przykładem takiego układu jest wahadło techniczne.

Proponowana nowa metoda polega na wprowadzeniu układu wieszakowego w drgania swobodne, podczas których rejestrowane są przyspieszenie i przemieszczenie masy, zawieszony na wieszakach. Przypomina się wynik rozdz. 2, że gdy w przegubach występuje tarcie suche, to jednostkowa siła zwrotna nie zależy od obciążenia układu siłami ciężkości a przyspieszenie ma bezpośredni związek z jednostkową siłą zwrotną. Oznacza to również, że częstość własna układu jest niezależna od obciążenia siłami ciężkości. Ta właściwość umożliwia przeniesienie wyników pomiarów stanowiskowych, gdzie obciążenie jest zwykle niższe niż występujące podczas pracy układu w eksploatacji, na warunki obciążenia występujące w eksploatacji [3].

Zalety metody to:

- zapewnienie realistycznych prędkości ślizgania w przegubach,
- parametry inercyjne układu, jego geometria, w tym profile elementów przegubów nie muszą być znane,
- rejestracja w jednym przebiegu pomiarowym zbioru pętli histerezy odpowiadających ślizganiu i toczeniu, a więc,
- prowadzenie identyfikacji parametrycznej na pełnym zbiorze danych,
- tańsze oprzyrządowanie pomiarowe niż przy innych metodach pomiaru,
- krótki czas pomiaru.

Nowy sposób identyfikacji parametrycznej został przedstawiony na przykładzie wahadła technicznego.

4. Identyfikacja parametryczna modelu wahadła technicznego

Wahadło techniczne o nieruchomym sworzniu zostało wyposażone w czujnik przemieszczeń i przyspieszeniometer jak pokazano na rys. 9. Oś czułości przyspieszeniometera jest prostopadła do osi pręta.

Jak wiadomo, równowaga wahadła wymaga, aby wypadkowa siła $Mg / \cos \gamma$ działająca na masę była współliniowa z linią 0-A. Poprzeczna składowa tej siły to $P_y = Mg \tan \gamma$. Jednostkowa siła zwrotna to $P_y / (Mg) = \tan \gamma$.

Celem pomiaru jest wyznaczenie $\tan \gamma$ jako funkcji przemieszczenia kątowego pręta, do którego przymocowana jest masa M . Czujnik przemieszczeń umożliwia wyznaczenie tangensa kąta ϕ . Przyspieszeniometer rejestruje przyspieszenie η wzdłuż osi czułości, a więc prostopadle do osi pręta.

Gdy $\phi > 0$, $\dot{\phi} > 0$ jak na rys.9, to ruch wahadła jest opóźniany. Opóźnienie masy M na kierunku poziomym wynosi $g \tan \gamma$ a siła P_y to siła bezwładności masy M . Opóźnienie w kierunku prostopadłym do pręta wynosi $g \tan \gamma \cos \phi$. Na masę m przyspieszeniometera inercyjnego, wzdłuż jego osi czułości działa siła $mg \sin \phi$, a więc jej przyspieszenie wynosi $g \sin \phi$, ze zwrotem jak na rys.9. Korpus przyspieszeniometera ma to samo przyspieszenie co masa M , równe $g \tan \gamma \cos \phi$.

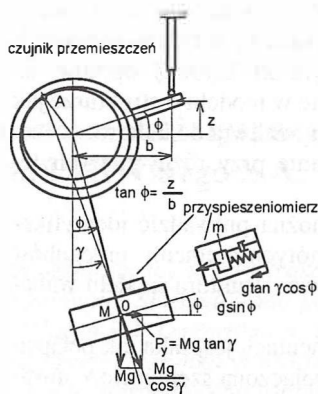
Sygnal wyjściowy przyspieszeniometera w jednostkach fizycznych przyspieszenia wynosi

$$\eta = g(\tan \gamma \cos \phi - \sin \phi). \quad (5)$$

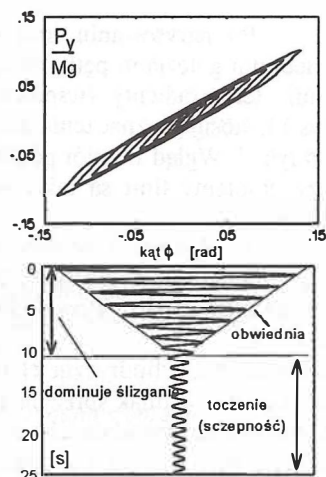
Stąd

$$\tan \gamma = \tan \phi + \frac{\eta}{g \cos \phi}. \quad (6)$$

Należy zauważyć, że do wyznaczenia $\tan \gamma$ nie jest konieczna znajomość wymiarów wahadła, geometrii elementów przegubu oraz wartości masy M . Jedynym warunkiem jest, aby siła tarcia przegubie podlegała prawu Coulomb'a tarcia suchego.



Rys. 9 Oprzyrządowane wahadło techniczne



Rys. 10 Zarejestrowane przemieszczenia kątowej pętli siły zwrotnej

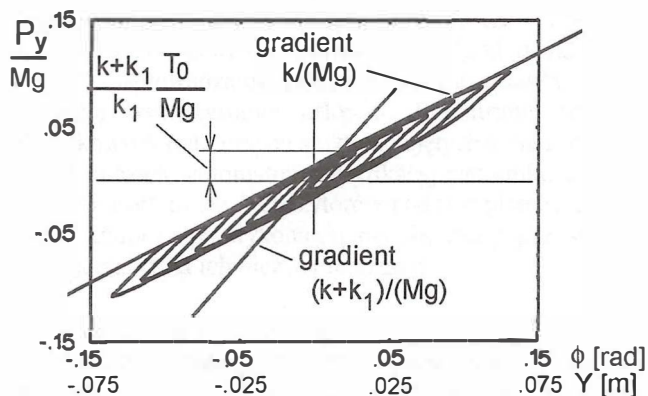
Założenie to może być zweryfikowane natychmiast po zarejestrowaniu zbioru pętli histerezy, jak pokazano poniżej.

Zarejestrowany zbiór pętli przedstawia wykres w górnej części rys. 10. Przebieg czasowy przemieszczenia kątowego, pokazany w dolnej części rys. 10, to w początkowej fazie ruch tłumiony. W tej fazie elementy przegubu głównie ślizgają się po sobie. Obwiednia drgań tłumionych składa się z linii prostych, co świadczy o tłumieniu tarcie suchym Coulomb'a.

W drugiej fazie ruchu dyssypacja jest bardzo słaba, bowiem elementy przegubu toczą się po sobie. W ciągu 25-sekundowego pomiaru uzyskano zbiór pętli odpowiadających zarówno ślizganiu jak i toczeniu. Ten zbiór jest wykorzystywany do identyfikacji parametrycznej modelu.

Znając strukturę modelu można przeprowadzić identyfikację parametryczną metodą graficzną. W tym celu zarejestrowany zbiór pętli histerezy jest wyświetlany przy użyciu programu graficznego, umożliwiającego aproksymację linii funkcjami matematycznymi.

W rozpatrywanym przypadku wystarczająca jest aproksymacja gałęzi pętli liniami prostymi, jak pokazano na rys.11.



Rys. 11 Identyfikacja parametryczna modelu wahadła technicznego

Po narysowaniu linii pokrywających się z odpowiednimi gałęziami pętli, obliczane są w tle równania tych linii. Ich gradienty (współczynniki kątowe) opisano na rys. 11, stosując oznaczenia użyte w modelu o strukturze jak na rys. 7. Wgląd w zbiór pętli umożliwia dodatkowo ocenę, czy gradienty linii są takie same przy różnych wychyleniach.

W identyczny sposób można prowadzić identyfikację parametryczną układów, których elementy przegubów nie są cylindryczne. Przykładowo, struktura modelu wahadła

o innych niż cylindryczne elementach jest taka jak pokazano na rys. 7, jednak sprężyna połączona szeregowo z suwakiem będzie posiadała charakterystykę nieliniową. Wtedy odcinki pętli o wyższym gradiencie, odpowiadające szczepności (toczeniu) nie będą odcinkami linii prostej. Podczas identyfikacji graficznej można uzyskać opis linii zaproponowanym równaniem, a więc wyznaczyć charakterystykę sprężyny nieliniowej modelu.

Przedstawiona metoda pomiaru i identyfikacji parametrycznej jest przeznaczona do zawieszonych pojazdów szynowych typu wieszakowego, które zazwyczaj spełniają założenie o prawie Coulomb'a tarcia suchego.

5. Uwagi końcowe

Opracowano nowy sposób parametrycznej identyfikacji układów wieszakowych z tarciami suchymi, w szczególności do zawieszonych pojazdów szynowych. Istotnym elementem tego sposobu jest nowa metoda rejestracji zbioru pętli histerezy jednostkowej siły zwrotnej podczas drgań swobodnych układu. Zaletą metody jest to, że drganiom swobodnym towarzyszą takie prędkości ślizgania w przegubach układu, które są bliskie prędkościom ślizgania występującym podczas eksploatacji pojazdu.

Pomiarowe wyznaczenie pętli histerezy nie wymaga znajomości wymiarów układu, profili współpracujących ze sobą elementów przegubów oraz parametrów inercyjnych układu.

Identyfikacja parametryczna modelu układu wieszakowego jest prowadzona przy użyciu graficznego programu narzędziowego na pełnym zbiorze wyników pomiarowych w postaci zbioru pętli. Aby przeprowadzić identyfikację należy znać strukturę modelu fenomenologicznego, lub wydedukować ją na podstawie kształtu pętli. Oprzyrządowanie pomiarowe jest tańsze niż stosowane w innych metodach a czas przebiegu pomiarowego jest krótki.

Opracowany sposób identyfikacji parametrycznej jest obecnie testowany na rzeczywistym zawieszeniu UIC dwuosioowego wagonu towarowego na stanowisku laboratoryjnym w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej.

Literatura

- [1] Piotrowski, J.: *Model of the UIC link suspension for freight wagons. Archive of Applied Mechanics* 73(2003)
- [2] Piotrowski, J.: *Model matematyczny zawieszenia UIC do wagonów towarowych i eksperymentalna weryfikacja jego elementów. Zesz. Nauk. Inst. Pojazdów* 2(45) 2002
- [3] Piotrowski, J.: *On application of the rolling contact theory for modelling of UIC link suspension for freight wagons. Zesz. Naukowe Instytutu Pojazdów*, 3(50)/2003
- [4] Grzelak, A., Pawłowski, M.: *Pomiary geometrii elementów toczno-ślizgowych przegubów zawieszenia typu UIC do wagonów towarowych. Zesz. Naukowe Inst. Pojazdów*. 3(50) 2003