MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-M/2011
ZESZYT 2
ROK 108
ISSUE 2
YEAR 108

JAN ŁUCZKO*

PORÓWNANIE DYNAMICZNYCH ODPOWIEDZI SEMIAKTYWNYCH TŁUMIKÓW OPISANYCH MODELAMI BOUC-WENA I SPENCERA

COMPARISON OF DYNAMICAL RESPONSES OF SEMIACTIVE DAMPERS DESCRIBED BY THE BOUC-WEN AND THE SPENCER MODELS

S t r e s z c z e n i e

W niniejszym artykule zbadano efektywność tłumienia drgań i wstrząsów przez tłumiki semiaktywne, opisane modelami histerezowymi typu Bouc-Wena i Spencera. Zastosowano dwa algorytmy typu on-off sterowania parametrami tłumika. Rezultaty obliczeń porównano z odpowiednimi wynikami otrzymanymi dla układów pasywnych. Wykazano pewne różnice jakościowe w zachowaniu się obu modeli w zakresie niższych częstości.

Słowa kluczowe: *tłumik semiaktywny*, *sterowanie drganiami*, *model zawieszenia*, *histereza*

A b s t r a c t

The paper has investigated the efficiency of vibration and shock damping through semiactive absorbers described by the Bouc-Wen and the Spencer models. Two algorithms of on-off control type were applied to change the values of dissipative parameters. The results of calculations were compared with suitable results obtained for passive systems. Some qualitative differences of dynamical behaviour of the Bouc-Wen and the Spencer models were shown in the lower frequency range.

Keywords: *semiactive damper*, *vibration control*, *suspension system*, *hysteresis*

* Dr hab. inż. Jan Łuczko, prof. PK, Instytut Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

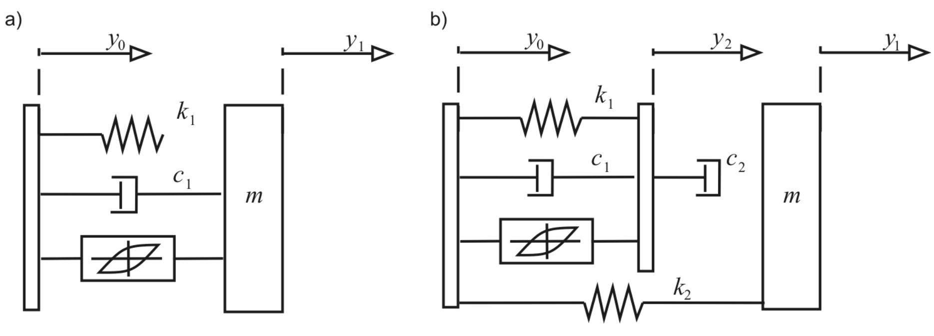
1. Wstęp

Do opisu właściwości dynamicznych tłumików hydraulicznych, magnetoreologicznych (MR) lub elektroreologicznych (ER), są wykorzystywane modele o charakterystykach histerezowych. Najczęściej są to modele Binghama [12], Bouc-Wena [2-4, 12, 14] lub Spencera [5, 7, 10, 12]. W przypadku stosowania cieczy elektro- i magnetoreologicznych można, sterując natężeniem pola elektrycznego lub magnetycznego za pośrednictwem prądu płynącego w uzwojeniu sterującym tłumika, zmieniać siłę oporu wytwarzaną przez tłumik. Rezultatem zmiany napięcia jest zmiana wartości pewnych parametrów przyjętego do badań modelu.

Tłumiki ER i MR mogą więc być wykorzystane jako tłumiki semiaktywne, które stanowią alternatywę dla aktywnego sterowania drganiami, głównie ze względu na fakt, że stosunkowo niewielka energia pozwala sterować rozpraszaniem energii wielokrotnie większych.

W artykule poddano analizie klasyczny model sterowania typu sky-hook, badając wpływ wybranych parametrów na efektywność działania tłumika. Wartości pozostałych parametrów przyjęto na podstawie danych literaturowych, przy czym w celu ograniczenia ich liczby wprowadzono wielkości bezwymiarowe, eliminując w ten sposób między innymi wpływ amplitudy wymuszenia kinematycznego.

2. Model układu



Rys. 1. Model układu: a) Bouc-Wena, b) Spencera

Fig. 1. Model of the system: a) the Bouc-Wen model, b) the Spencer model

Do badań przyjęto model układu przedstawiony na rys. 1, przy czym element tłumiący drgania opisano alternatywnie za pomocą modelu Bouc-Wena (rys. 1a) oraz modelu Spencera (rys. 1b). Parametry k_j i c_j (j = 1, 2) są tu odpowiednio współczynnikami sztywności i tłumienia wiskotycznego, a m jest masą wibroizolowanego obiektu, którego ruch określa współrzędna y_1. Współrzędna y_0 jest zadanym wymuszeniem kinematycznym (podczas badania efektywności amortyzatora założono $y_0 = a\sin\omega t$). W modelu Spencera (rys. 1b) występuje dodatkowy bezmasowy element, którego ruch opisuje współrzędna y_2.

Dla modelu Bouc-Wena z II zasady Newtona wynika następujące równanie:

$$m\ddot{y}_1 = -k_1(y_1 - y_0) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - \alpha_0 z_0 \tag{1}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przy czym zmienna z_0, odpowiedzialna za tworzenie się pętli histerezy, jest rozwiązaniem równania różniczkowego pierwszego rzędu:

$$\dot{z}_0 = A_0 \dot{y}_w - \gamma_0 \dot{y}_w \, | z_0 |^n - \beta_0 \, | \dot{y}_w | \, | z_0 |^{n-1} z_0 \tag{2}$$

gdzie: $y_w = y_1 – y_0$, natomiast A_0, γ_0, β_0 oraz n są współczynnikami kształtu charakterystyki.

W celu zmniejszenia liczby parametrów wpływających na charakterystyki dynamiczne układu wskazane jest wprowadzić następujące zmienne bezwymiarowe:

$$\tau = \omega_0 t \qquad x = (y_1 - y_0)/a \qquad x_0 = y_0/a \qquad z = z_0 / z_{\max} \tag{3}$$

gdzie:

$$z_{\max} = \sqrt[n]{\frac{A_0}{\beta_0 + \gamma_0}} \tag{4}$$

Model Bouc-Wena stanowi teraz układ dwóch równań różniczkowych o postaci:

$$x'' + \zeta_1 x' + x + \alpha z = -x_0''(\tau) \tag{5}$$

$$z' = A\{1 - [\gamma + \beta \operatorname{sgn}(zx')] \, | z |^n\} x' \tag{6}$$

przy czym x' i z' są pochodnymi względem zmiennej τ. Przyjęto również oznaczenia:

$$A = A_0 / z_{\max} \qquad \beta = \beta_0 / (\beta_0 + \gamma_0) \qquad \gamma = \gamma_0 / (\beta_0 + \gamma_0) \tag{7}$$

$$\alpha = \alpha_0 z_{\max} / k_1 \qquad \zeta_1 = c_1 / m\omega_0 \qquad \eta = \omega / \omega_0 \tag{8}$$

W modelu Spencera, będącego modyfikacją modelu Bouc-Wena, wykorzystuje się równanie (2), odpowiedzialne za efekty histerezowe, przy czym teraz zgodnie z rys. 1b należy do niego podstawić $y_w = y_2 – y_0$. Ruch masy m opisuje równanie różniczkowe:

$$m\ddot{y}_1 = -k_2 (y_1 - y_0) - c_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \tag{9}$$

natomiast zmienną y_2 wyznacza się z warunku równowagi sił:

$$k_1 (y_2 - y_0) + c_1 (\dot{y}_2 - \dot{y}_0) + \alpha_0 z_0 = c_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \tag{10}$$

Po wprowadzeniu zmiennych τ, x_0, x i z, zdefiniowanych wzorami (3) oraz zmiennej:

$$y = (y_2 - y_0)/a \tag{11}$$

ruch układu jest opisany równaniem (6) oraz układem równań:

$$x'' + \zeta_2 (x' - y') + x = -x_0''(\tau) \tag{12}$$

$$y' = (\zeta_2 x' - \kappa x - \alpha z) / (\zeta_1 + \zeta_2) \tag{13}$$

gdzie:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_2}{m}} \qquad \zeta_2 = c_2 / m\omega_0 \qquad \alpha = \alpha_0 z_{\max} / k_2 \qquad \kappa = k_1 / k_2 \tag{14}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Sterowanie sky-hook

Jedną z najbardziej znanych strategii sterowania semiaktywnym układem zawieszenia jest tzw. sterowanie sky-hook [6, 11, 13], w którym współczynniki tłumienia są dobierane w ten sposób, aby naśladować efekt tłumika połączonego ze stałym poziomem odniesienia. W uproszczonej formie sterowanie sky-hook realizuje układ sterowania włączający i wyłączający w odpowiednich chwilach tłumienie w elemencie semiaktywnym (sterowanie on-off) lub bardziej praktycznie przełączający wartość tego tłumienia z wartości maksymalnej do minimalnej. Pożądaną zmianę własności tłumiących można uzyskać, przyjmując za sygnał sterujący napięcie na sterowniku, zmieniające się skokowo od wartości maksymalnej do zerowej.

Zwykle przyjmuje się, że o zmianie napięcia decyduje znak iloczynu siły i prędkości (dostarczana do układu moc) lub w uproszczeniu znak iloczynu prędkości bezwzględnej $v_b = x'+x_0'$ i względnej $v_w = x'$. Dla wprowadzonych zmiennych bezwymiarowych powyższy warunek można zapisać następująco:

$$u_0 = \begin{cases} 1 & x'(x'+x_0') > 0 \\ 0 & x'(x'+x_0') \le 0 \end{cases} \tag{15}$$

przy czym założono tu, że u_0 jest bezwymiarowym napięciem odniesionym do jego dopuszczalnej wartości maksymalnej. Jak się okaże dalej, lepsze rezultaty w zakresie wyższych częstości wymuszenia uzyskuje się, stosując sterowanie zmodyfikowane w następujący sposób:

$$u_0 = \begin{cases} 1 & x'(x'+x_0') > 0 \;\wedge\; u_0 > 1 \\ \delta\,|\,x'+x_0'\,| & x'(x'+x_0') > 0 \;\wedge\; u_0 \le 1 \\ 0 & x'(x'+x_0') \le 0 \end{cases} \tag{16}$$

W przypadku prowadzenia obliczeń na wielkościach bezwymiarowych można przyjąć $\delta = 1$.

Wartości współczynników tłumienia c_1 i c_2 oraz parametru α_0 (lub bezwymiarowych parametrów ζ_1, ζ_2 oraz α) zależą od napięcia u uzyskanego w rezultacie przepuszczenia napięcia u_0 przez filtr I rzędu:

$$u' = -\lambda(u - u_0) \tag{17}$$

Założono dalej, że pomiędzy napięciem u i parametrami ζ_1, ζ_2 oraz α zachodzą liniowe związki:

$$\alpha = \alpha_{\min} + (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})u \qquad \zeta_j = \zeta_{j\min} + (\zeta_{j\max} - \zeta_{j\min})u \tag{18}$$

4. Odpowiedź układu na wymuszenie harmoniczne

W pracach [4, 5, 7 12, 14] podano wartości parametrów dla różnych modeli tłumików MR. Przykładowo, w pracy [12] przyjęto następujące wartości parametrów, określających model Bouc-Wena: k_1 = 2500 Nm^{-1}, c_1 = 5000 Nsm^{-1}, α_0 = 88 000 N/m,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$\beta_0 = \gamma_0 = 10^6$ m^{-2}, $A_0 = 120$ oraz model Spencera: $k_1 = 1400$ Nm^{-1}, $k_2 = 540$ Nm^{-1}, $c_1 = 5300$ Nsm^{-1}, $c_2 = 93\,000$ Nsm^{-1}, $\alpha_0 = 96\,300$ N/m, $\beta_0 = \gamma_0 = 2 \cdot 10^6$ m^{-2}, $A_0 = 207$. W obu przypadkach badano odpowiedź układu na wymuszenie harmoniczne o amplitudzie $a = 0{,}015$ m i częstotliwości 2,5 Hz dla $n = 2$ i $\omega_0\lambda = 190$ s^{-1}. Przyjmując dodatkowo wartość masy $m \approx 350$ kg, odpowiadającej ćwiartkowemu modelowi zawieszenia samochodu oraz uwzględniając sztywność resora ($k_0 \approx 30\,000$ N/m) poprzez zwiększenie wartości współczynników k_1 dla modelu Bouc-Wena i k_2 w modelu Spencera, można oszacować wartości bezwymiarowych parametrów (7), (8) i (14), a także ich wartości graniczne występujące we wzorach (18).

W obliczeniach numerycznych przyjęto $\zeta_{1\min} = 0{,}2$, $\zeta_{1\max} = 0{,}8$ dla modelu Bouc-Wena i $\zeta_{1\min} = 0{,}25$, $\zeta_{1\max} = 1$, $\zeta_{2\min} = 2{,}5$, $\zeta_{2\max} =1\ 0$, $\kappa = 0{,}05$ dla modelu Spencera. Założono też jednakowe wartości pozostałych współczynników: $\beta = \gamma = 0{,}5$, $A = 100$, $\alpha_{\min} = 0{,}5$, $\alpha_{\max} = 1{,}5$, $\lambda = 50$. Dla tak dobranych wartości bezwymiarowych parametrów charakterystyki dynamiczne obu układów są do siebie zbliżone.

Badając skuteczność tłumienia drgań, przyjęto:

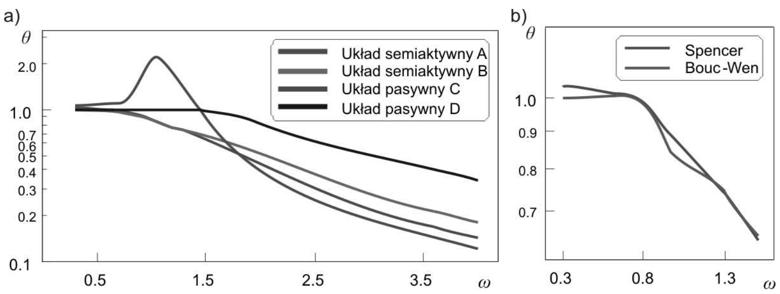
$$x_0(\tau) = \sin\eta\tau \qquad x_0''(\tau) = -\eta^2 \sin\eta\tau \tag{19}$$

oraz wprowadzono wskaźnik efektywności działania amortyzatora:

$$\theta = \frac{x_b^{RMS}}{x_0^{RMS}} \tag{20}$$

zdefiniowany jako stosunek wartości skutecznych przemieszczeń $x_b = x + x_0$ oraz x_0.

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy ilustrujące wpływ bezwymiarowej częstości η na wskaźnik efektywności θ. Ograniczono się do pokazania w pełnym zakresie tylko częstości charakterystyk modelu Spencera (rys. 2a). Charakterystyki modelu Bouc-Wena w zasadzie się z nimi pokrywają, z wyjątkiem zakresu niskich częstości (rys. 2b); tu także występują pewne, omówione dalej, różnice jakościowe. Na rysunku 2a przedstawiono też w celach porównawczych charakterystyki dla układów pasywnych C i D o ustalonych, odpowiednio minimalnych i maksymalnych, wartościach parametrów α i ζ_j.



Rys. 2. Wskaźnik efektywności: a) model Spencera, b) porównanie modeli Bouc-Wena i Spencera

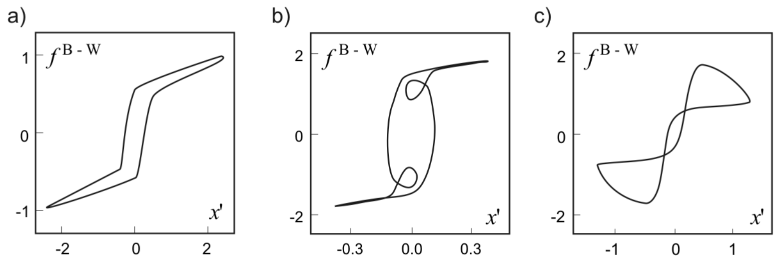
Fig. 2. Efficiency index: a) the Spencer model, b) comparison of Bouc-Wen and Spencer models

W zakresie rezonansowym (dla $\eta < 2$) wskaźnik θ dla układów semiaktywnych A i B osiąga znacząco mniejsze wartości w stosunku do wskaźnika wyznaczonego dla układów

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

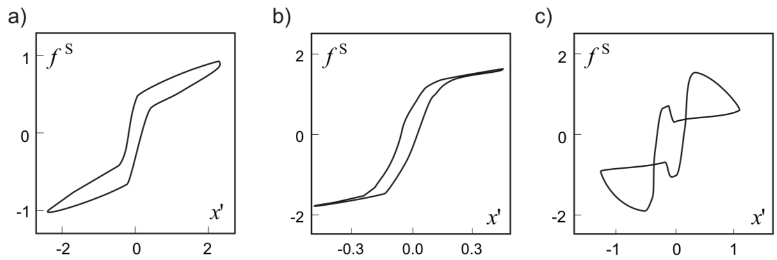
pasywnych C i D. W zakresie wyższych częstości najwyższą efektywność działania wykazuje układ pasywny C, jednak wartości wskaźnika θ dla układu A są w tym zakresie porównywalne i równocześnie mniejsze od uzyskanych dla układu B ze sterowaniem dwupołożeniowym (15).

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono chakterystyki tłumików, opisanych odpowiednio modelami Bouc-Wena i Spencera, dla przypadku u_0 = 0 (minimalne tłumienie), u_0 = 1 (maksymalne tłumienie) oraz dla $u_0(\tau)$ określonego regułą sterowania (16).



Rys. 3. Charakterystyka siły – model Bouc-Wena (η = 1,45, κ_1 = 0,05):
a) u_0 = 0, b) u_0 = 1, c) $u_0 = u_0(\tau)$

Fig. 3. Force-velocity diagram – Bouc-Wen model (η = 1,45, κ_1 = 0,05):
a) u_0 = 0, b) u_0 = 1, c) $u_0 = u_0(\tau)$



Rys. 4. Charakterystyka siły – model Spencera (η = 1,45, κ_2 = 0,05):
a) u_0 = 0, b) u_0 = 1, c) $u_0 = u_0(\tau)$

Fig. 4. Force-velocity diagram – Spencer model (η = 1,45, κ_2=0,05):
a) u_0 = 0, b) u_0 = 1, c) $u_0 = u_0(\tau)$

W przypadku modelu Bouc-Wena siła tłumienia jest wyznaczana ze wzoru:

$$f^{\text{B-W}} = \zeta_1 x' + \kappa_1 x + \alpha z \qquad (21)$$

przy czym $\kappa_1 = k_1^{\text{B-W}} / k_1 \quad (k_1 = k_1^{\text{B-W}} + k_0)$, a dla modelu Spencera wyraża się ona wzorem:

$$f^{\text{S}} = \zeta_1 y' + \kappa y + \alpha z + \kappa_2 x = \zeta_2 (x' - y') + \kappa_2 x \qquad (22)$$

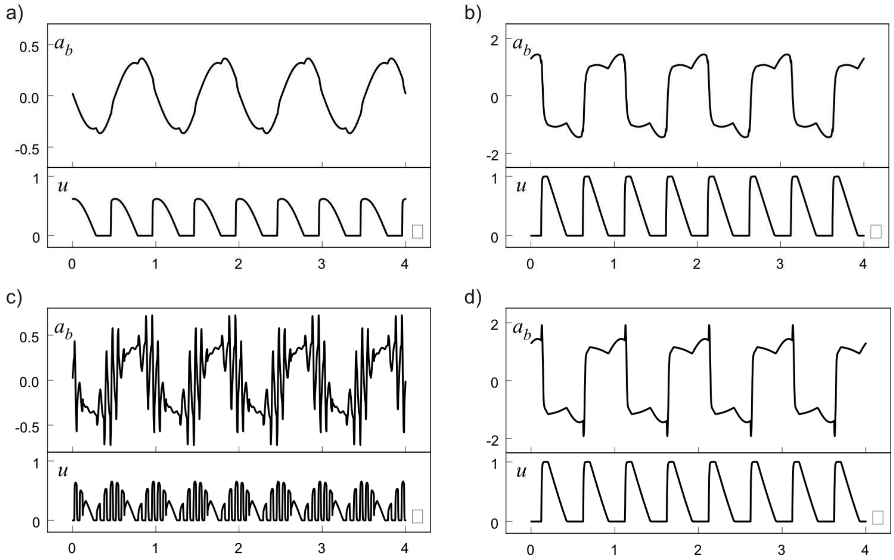
gdzie:

$$\kappa_2 = k_2^{\text{S}} / k_2 \quad (k_2 = k_2^{\text{S}} + k_0).$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W szerokim zakresie częstości charakterystyki sił odpowiadające pasywnym modelom (dla u_0 = const) Bouc-Wena i Spencera są w sensie jakościowym podobne i zbliżone do przedstawionych na rys. 3a, 4a i 4b. Dopiero dla $\eta \leq 1{,}5$ można zauważyć pewne różnice (rys. 3b i 4b), przy czym zwiększają się one wraz ze zmniejszaniem częstości wymuszenia. Zmianę kształtu charakterystyk obserwuje się tylko dla modelu Bouc-Wena. Zmianom tym towarzyszy zmiana przebiegów przemieszczeń i prędkości (zwłaszcza względnych), które chociaż pozostają okresowe, zawierają znaczną liczbę wyższych harmonicznych.

Także w przypadku semiaktywnych modeli tylko w zakresie wyższych częstości charakterystyki otrzymane dla modelu Spencera (rys. 4c, 5b) i Bouc-Wena (rys. 3c, 5d) są do siebie podobne. Dla częstości wymuszeń niższych od częstości drgań własnych następuje wyraźna zmiana (rys. 5a i 5c) przebiegów przemieszczeń, prędkości oraz przyspieszeń. Wykresy wszystkich wymienionych zmiennych dla modelu Bouc-Wena mają złożone przebiegi, co powoduje częste zmiany znaku iloczynu prędkości bezwzględnej i względnej, wpływając istotnie na przebieg napięcia sterującego u (rys. 5c).



Rys. 5. Przebiegi czasowe bezwzględnego przyspieszenia a_b=x''+x_0'' i napięcia sterującego u: model Spencera: a) η = 0,6, b) η = 1,5, model Bouc-Wena: c) η = 0,6, d) η = 1,5

Fig. 5. Time histories of absolute acceleration a_b=x''+x_0'' and control voltage u: the Spencer model: a) η = 0,6, b) η = 1,5, the Bouc-Wena model: c) η = 0,6, d) η = 1,5

5. Odpowiedź układu na wymuszenie impulsowe

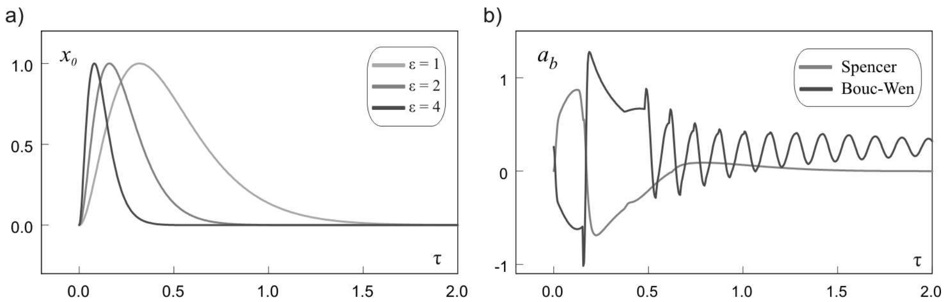
Do opisu wymuszenia symulującego wstrząsy można wykorzystać funkcję „rounded pulse", zdefiniowaną następująco [1, 8, 9, 11]:

$$x_0(\tau) = \frac{1}{4} e^2 (\varepsilon\tau)^2 \exp(-\varepsilon\tau) \tag{23}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Bezwymiarowy parametr ε, charakteryzujący ostrość impulsu, określa stosunek połowy okresu drgań własnych układu do czasu trwania impulsu. Funkcja (23) charakteryzuje się ciągłością pierwszej i drugiej pochodnej oraz osiąga wartość maksymalną równą jedności (rys. 6a). Do równań (5) i (12) należy teraz podstawić:

$$x_0''(\tau) = \frac{1}{4}\varepsilon^2 e^2 [2 - 4\varepsilon\tau + (\varepsilon\tau)^2]\exp(-\varepsilon\tau) \tag{24}$$

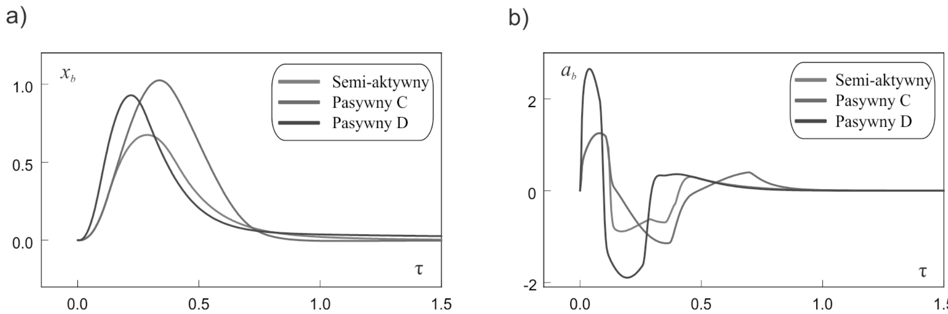


Rys. 6a) Wymuszenie impulsowe, b) odpowiedź układu semiaktywnego – przyspieszenie (ε = 1)

Fig. 6a) Rounded pulse function excitations, b) response of semiactive system – acceleration (ε = 1)

Na rysunku 6b przedstawiono porównanie odpowiedzi (przyspieszeń bezwzględnych) układu Bouc-Wena i Spencera z zastosowanym algorytmem sterowania (16).

Dla modelu Bouc-Wena obserwuje się oscylacyjny charakter zanikania drgań. Dodatkową wadą tego modelu jest fakt, że stan równowagi zależy od warunków początkowych. Fakt ten można wytłumaczyć, analizując równania (5) i (6) w stanie równowagi, czyli dla $z' = 0$, $x' = 0$ i $x'' = 0$ oraz przy założeniu braku wymuszenia ($x_0'' = 0$). Wówczas równanie (6) może być spełnione dla dowolnej wartości z, natomiast z równania (5) wynika warunek $x + \alpha z = 0$, a więc również współrzędna x zależy liniowo od współrzędnej z.



Rys. 7. Odpowiedzi układów pasywnych oraz tłumika semiaktynego – model Spencera (ε = 2): a) przemieszczenia bezwględne $x_b = x + x_0$, b) przyspieszenia bezwględne $a_b = x'' + x_0''$

Fig. 7. The responses of passive and semiactive dampers – the Spencer model (ε = 2): a) absolute displacements $x_b = x + x_0$, b) absolute accelerations $a_b = x''+x_0''$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Rysunek 7 ilustruje efektywność działania semiaktywnego układu, opisanego modelem Spencera, w przypadku występowania wymuszeń impulsowych. Zarówno maksymalne przemieszczenia, jak i przyspieszenia osiągają znacząco mniejsze wartości w stosunku do układu pasywnego z minimalnym (układ C) i maksymalnym (układ D) rozpraszaniem energii.

6. Wnioski

Z analizy przedstawionych w pracy wyników oraz z obserwacji rezultatów obliczeń przeprowadzonych dla innych danych można wyciągnąć następujące wnioski:

– Odpowiedzi dynamiczne modelu Spencera na wymuszenia okresowe są w szerokim zakresie częstości wymuszeń jakościowo podobne. Ponieważ w stanach ustalonych przebiegi prędkości względnych i bezwzględnych są zbliżone do harmonicznych, częstość zmian napięcia sterującego w układzie semiaktywnym jest dwukrotnie większa od częstości wymuszenia.
– Model Bouc-Wena zachowuje się podobnie tylko w zakresie wyższych częstości. W zakresie rezonansowym w odpowiedziach układu dużą rolę odgrywają wyższe harmoniczne, wpływając istotnie na sterowanie. W przypadku zastosowania sterowania typu on-off obserwuje się zwiększoną liczbę zmian skokowych napięcia.
– Efektywność działania tłumików semiaktywnych w stosunku do układów pasywnych jest duża, głównie w pobliżu rezonansu. Dla wymuszeń okresowych wysoko częstotliwościowych nieznacznie lepszymi są tłumiki pasywne o małych wartościach współczynnika tłumienia. Jednak dla wymuszeń impulsowych wyraźnie uwidaczniają się zalety tłumika semiaktywnego.
– W zakresie wyższych częstości zastosowanie sterowania określonego regułą (16) zwiększa wyraźnie efektywność tłumika w stosunku do sterowania dwupołożeniowego (15).

Literatura

[1] Chandra Shekhar N., Hatwal H., Mallik A.K., *Performance of non-linear isolators and absorbers to shock excitations*, Journal of Sound and Vibration, 227(2), 1999, 293-307.

[2] Dominguez A., Sedaghati R., Stiharu I., *Modeling and application of MR dampers in semi-adaptive structures*, Computers & Structures, 86, 2008, 407-415.

[3] Dominguez-Gonzalez A., Stiharu I., Sedaghati R., *Practical hysteresis model for magneto-rheological dampers based on the Bouc-Wen model*, Smart Materials and Structures (złożony do druku).

[4] Gopala Rao L.V.V., Narayanan S., *Sky-hook control of nonlinear quarter car model traversing rough road matching performance of LQR control*, Journal of Sound and Vibration, 323, 2009, 515-529.

[5] Kim Y., Langari R., Hurlebaus S., *Semiactive nonlinear control of a building with a magnetorheological damper system*, Mechanical Systems and Signal Processing, 23, 2009, 300-315.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[6] L i u Y., W a t e r s T.P., B r e n n a n M.J., *A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances*, Journal of Sound and Vibration, 280, 2005, 21-39.
[7] P r a b a k a r R.S., S u j a t h a C., N a r a y a n a n S., *Optimal semi-active preview control response of a half car vehicle model with magnetorheological damper*, Journal of Sound and Vibration, 326, 2009, 400-420.
[8] S a p i ń s k i B., *Real-time control for a magnetorheological shock absorber in a driver seat*, Journal of Theoretical and Aplied Mechanics, 43, 3, 2005, 631-653.
[9] S a p i ń s k i B., *Real-time control of magnetorheological dampers in mechanical systems*, AGH University of Science and Technology Press, Kraków 2008.
[10] S a p i ń s k i B., M a r t y n o w i c z P., *Vibration control in a pitch-plane suspension model with MR shock absorbers*, Journal of Theoretical and Aplied Mechanics, 43, 3, 2005, 655-674.
[11] S a p i ń s k i B., R o s ó ł M., *MR damper performance for shock isolation*, Journal of Theoretical and Aplied Mechanics, 45, 1, 2007, 133-145.
[12] S p e n c e r Jr B.F., D y k e S.J., S a i n M.K., C a r l s o n J.D., *Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers,* ASCE Journal of Engineering Mechanics, 123, 3, 1996, 230-238.
[13] W u X., G r i f f i n M. J., *A semi-active control policy to reduce the occurrence and severity of end-stop impacts in a suspension seat with an electrorheological fluid damper*, Journal of Sound and Vibration, 203(5), 1997, 781-793.
[14] Y a o G.Z., Y a p F.F., C h e n G., L i W.H., Y e o S.H., *MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system*, Mechatronics, 12, 2002, 963-973.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ