BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-B/2010
ZESZYT 11
ROK 107
ISSUE 11
YEAR 107

JANUSZ KAWECKI, RYSZARD MASŁOWSKI*

ZASTOSOWANIE TŁUMIKÓW PASYWNYCH, QUASI-AKTYWNYCH I HYBRYDOWYCH DO REDUKCJI DRGAŃ SEJSMICZNYCH I PARASEJSMICZNYCH BUDOWLI – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

APPLICATION OF PASSIVE, SEMI-ACTIVE AND HYBRID DAMPERS FOR REDUCTION OF SEISMIC AND SEMI-SEISMIC VIBRATIONS OF STRUCTURES – REVIEW OF SOLUTIONS

Streszczenie

Różnego rodzaju tłumiki drgań są od wielu lat stosowane w celu redukcji drgań budowli wywoływanych oddziaływaniami dynamicznymi wiatru, sejsmicznymi i parasejsmicznymi. W ostatnich latach można zaobserwować znaczący rozwój w tej dziedzinie. Dotyczy to zarówno prac teoretycznych, jak i rozwiązań praktycznych. Prezentowany artykuł ma charakter przeglądowy. Szczególną uwagę zwrócono w nim na tłumiki pasywne, hybrydowe i quasi-aktywne. Mogą one bowiem znaleźć zastosowanie do redukcji drgań sejsmicznych i parasejsmicznych.

Słowa kluczowe: *pasywny tłumik drgań, hybrydowy tłumik drgań, quasi-aktywny tłumik drgań, budowla*

Abstract

Different kinds of vibration absorbers are for many years applied to reduce structural vibrations caused by dynamic actions, such as wind, seismic and less frequently semi-seismic excitations. In this area, an important progress can be noticed in recent years. It concerns both theoretical works and practical solutions. The present work is a kind of review. Special attention has been paid to passive, hybrid and semi-active systems that may be applied to reduce seismic and semi-seismic vibrations.

Keywords: passive vibration damper, hybrid vibration damper, semi-active vibration damper, building structure

* Prof. dr hab. inż. Janusz Kawecki, dr inż. Ryszard Masłowski, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Zadaniem, jakie staje przed projektantem konstrukcji inżynierskich jest zarówno zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości samej konstrukcji, jak i dbałość o komfort jej użytkowników. Problemy te komplikują się dodatkowo w sytuacji, gdy budowla jest poddawana oddziaływaniom dynamicznym, takim jak wiatr albo wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne. W celu redukcji odpowiedzi dynamicznej konstrukcji stosuje się różnego rodzaju tłumiki. W ostatnich latach można zaobserwować znaczący rozwój w tej dziedzinie. Odnosi się to zarówno do prac teoretycznych, jak i zastosowań praktycznych.

W niniejszym artykule, na podstawie analizy wybranych pozycji literatury oraz doświadczeń własnych, przedstawiono przegląd spotykanych rozwiązań tłumików drgań, zwracając uwagę przede wszystkim na rozwiązania qusi-aktywne i hybrydowe.

2. Współczesne trendy w budowie i zastosowaniach układów tłumiących w inżynierii lądowej

Znajdujące coraz częstsze zastosowanie aktywne, quasi-aktywne oraz hybrydowe układy tłumiące można traktować jako naturalne rozwinięcie układów pasywnych, takich jak izolatory drgań fundamentów czy pasywne układy rozpraszające energię. W tej ostatniej grupie występują mechaniczne tłumiki drgań, których badaniami oraz wdrażaniem ich wyników w praktyce inżynierskiej od wielu już lat zajmowali się autorzy niniejszego opracowania. Rozwój jaki nastąpił w ostatnich 25 latach w badaniach dotyczących tych rozwiązań zaowocował licznymi zastosowaniami prowadzącymi do redukcji drgań budowli nie tylko za pomocą układów pasywnych, ale także hybrydowych, quasi-aktywnych oraz aktywnych. Znaczne osiągnięcia w tym zakresie uzyskano szczególnie w Japonii, USA, Chinach i na Tajwanie.

Rozważając zastosowanie tłumików aktywnych, warto jednak zwrócić uwagę na istotne różnice, jakie pojawiają się przy zastosowaniu takich układów w inżynierii lądowej, w stosunku do inżynierii mechanicznej, elektrycznej czy lotnictwa. Są to przede wszystkim:

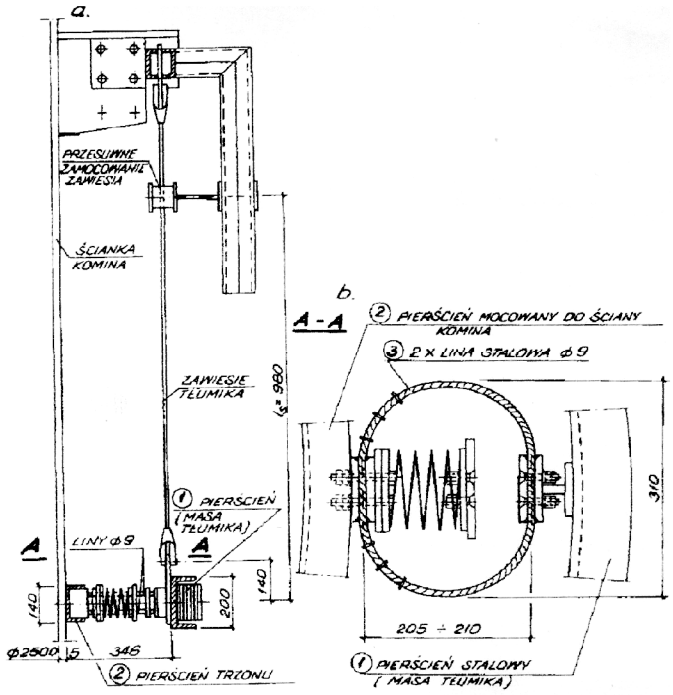
1) nieliniowość układu często powiązana ze znacznym stopniem niepewności zarówno w odniesieniu do parametrów budowli, jak i wymuszenia;
2) znacząco wyższy poziom sił sterujących, co znacznie utrudnia dobór siłowników spełniających oczekiwania projektanta;
3) trudności z zapewnieniem niezawodności funkcjonowania układów w sytuacji krytycznej, takiej jak: trzęsienie ziemi i huragan, czyli właśnie wtedy, gdy jest to szczególnie ważne.

Ze względu na wymienione wyżej utrudnienia coraz częściej w inżynierii lądowej znajdują zastosowanie układy hybrydowe lub układy qasi-aktywne. W przypadku takich rozwiązań efekt redukcji drgań jest osiągany najpierw dzięki układom pasywnym, to zaś pozwala na zmniejszenie mocy potrzebnej do zasilania układów aktywnych. Ponadto urządzenia tego rodzaju zachowują częściową zdolność do redukcji drgań, nawet w sytuacji utraty zasilania. Uwzględniając powyższe, w dalszej części artykułu zwrócono szczególną uwagę na rozwiązania pasywne, hybrydowe oraz quasi-aktywne.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Układy pasywne

Pasywne układy tłumiące są stosowane w celu redukcji drgań różnego rodzaju budowli, wywołanych działaniem wiatru lub wpływami sejsmicznymi. Wiele informacji na temat praktycznych rozwiązań z tego zakresu podano już m.in. w [1, 2 i 4]. Również w Polsce można przywołać przykłady zastosowania mechanicznych tłumików drgań. W pracach [6, 7] opisano zastosowania tłumików pasywnych do redukcji drgań telewizyjnych anten nadawczych umieszczanych na szczytach masztów i wież. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego mechanicznego tłumika drgań, współpracującego z kominami stalowymi podano na rys. 1.



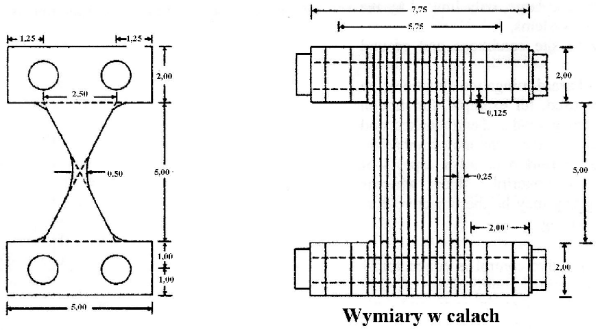
Rys. 1. Konstrukcja tłumika typu wahadłowego
Fig. 1. Construction of a pendulum-type damper

Wśród pasywnych układów tłumiących można wyróżnić następujące grupy:
- układy bazujące na niesprężystych deformacjach elementów metalowych,
- tłumiki cierne,
- tłumiki lepkosprężyste,
- lepkie tłumiki cieczowe,
- strojone tłumiki masowe,
- strojone tłumiki cieczowe.

Jednym z efektywnych sposobów dyssypacji energii są niesprężyste deformacje specjalnie w tym celu zaprojektowanych elementów metalowych. W wielu, spośród tego rodzaju układów tłumiących, stosowane są płyty trójkątne lub uformowane w kształcie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

litery X, wykonane ze stali miękkiej. Przykładem praktycznego rozwiązania tego typu jest tłumik ADAS [2], którego schemat pokazano na rys. 2. Nazwa wywodzi się z języka angielskiego: *added damping and stiffness* (dodane tłumienie i sztywność). Dzięki kształtowi płyt metalowych, przypominającemu literę X, deformacje plastyczne pojawiają się w znacznie większym obszarze niż mogłoby to wystąpić przy zastosowaniu płyty w kształcie prostokąta. Podobny układ konstrukcyjny doprowadza do znacznego zwiększenia dyssypacji energii.



Rys. 2. Tłumik typu ADAS
Fig. 2. ADAS-type damper

W tłumikach ciernych dyssypacja energii następuje w wyniku tarcia między dwoma ciałami stałymi przemieszczającymi się względem siebie. Liczne zastosowania tego rodzaju tłumików w USA i Kanadzie opisano w [8 i 9].

W tłumikach lepkosprężystych wykorzystywany jest efekt dyssypacji energii w materiałach lepkosprężystych. Do takich materiałów zalicza się specjalne polimery. Przekładki z takich materiałów umieszcza się pomiędzy elementami stalowymi konstrukcji. Przekładki te poddawane są naprężeniom ścinającym. Przykładowo ok. 10 000 takich tłumików zainstalowano w budynkach World Trade Center. Więcej informacji na ten temat podano w [2 i 4].

Lepkie tłumiki cieczowe od wielu lat są stosowane w rozwiązaniach konstrukcji militarnych. W ostatnich latach zaczęto je również stosować w obiektach inżynierii lądowej. W tłumikach takich dyssypacja energii następuje najczęściej podczas ruchu odpowiednio ukształtowanego tłoka umieszczonego w lepkiej cieczy.

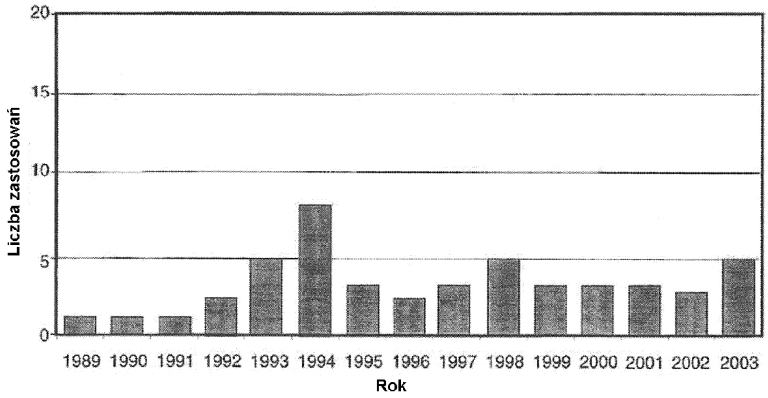
Strojony tłumik masowy zawiera dodatkową masę skupioną połączoną z konstrukcją budowli za pośrednictwem elementu sprężystego oraz elementu dyssypującego energię. Parametry tych elementów oraz miejsce zamocowania tłumika można tak dobrać, aby uzyskać optymalną redukcję drgań konstrukcji [7]. Pierwotnie tłumiki tego rodzaju stosowano głównie w celu ograniczenia drgań budowli wywołanych działaniem wiatru [5]. Ostatnio podejmowane są także próby zastosowania tych rozwiązań w przypadku działań sejsmicznych i parasejsmicznych.

Zasada działania strojonych tłumików cieczowych jest analogiczna do opisanej wyżej. Różnica polega na tym, że masę dodatkową stanowi w tym przypadku ciecz. Charakterystyka tłumików tego rodzaju jest na ogół bardzo nieliniowa. Wpływają na to zarówno drgania samej cieczy, jak i dodatkowe elementy konstrukcyjne występujące w tłumiku, służące do regulacji przepływu cieczy [2].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

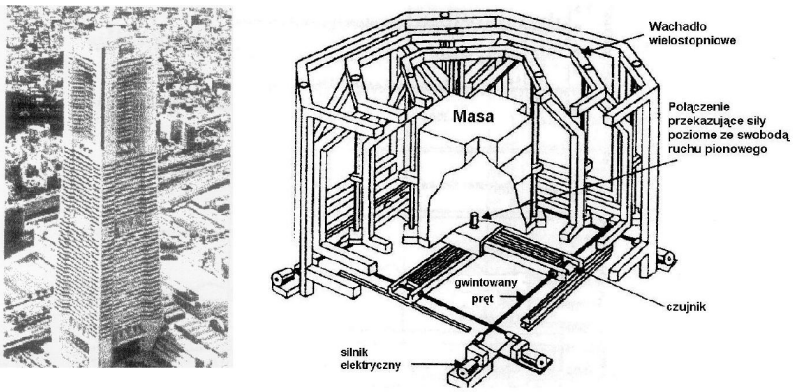
4. Hybrydowe układy tłumiące

Na rysunku 3 zobrazowano ([1]) wzrost zastosowań aktywnych tłumików hybrydowych i quasi-aktywnych, jaki obserwuje się w ostatnich latach. Warto zaznaczyć, że w podanych tu liczbach znaczący jest udział tłumików hybrydowych.



Rys. 3. Liczba zastosowań aktywnych, hybrydowych i quasi-aktywnych układów tłumiących [1]
Fig. 3. Number of installations – active, hybrid and semi-active systems [1]

Tłumik hybrydowy jest połączeniem strojonego tłumika masowego z dodatkowym elementem aktywnym, którego zadaniem jest poprawienie skuteczności rozwiązania pasywnego. Efektywność takiego tłumika zależy w głównej mierze od prawidłowego dostrojenia tłumika masowego. Siły pochodzące od aktywnego siłownika zwiększają jego skuteczność oraz zapewniają jego efektywną pracę w przypadku możliwej zmiany charakterystyki dynamicznej budowli podczas jej eksploatacji. Badania i obserwacje zrealizowanych tłumików hybrydowych wykazują, że zarówno siły, jak również ilość energii niezbędna do zapewnienia skutecznej pracy takiego tłumika są znacznie mniejsze niż potrzebne w układach aktywnych o porównywalnej skuteczności.

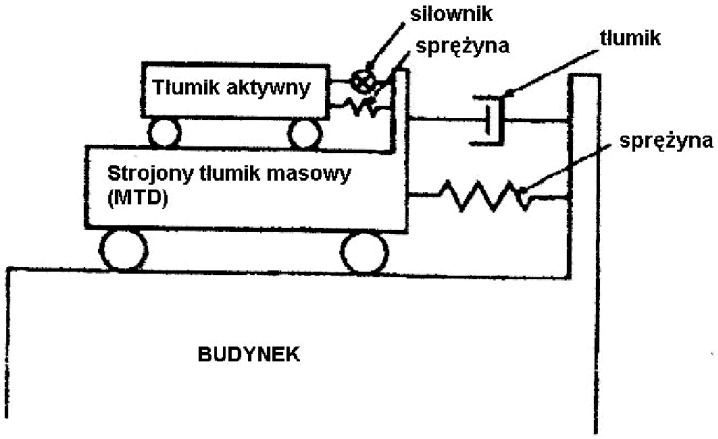


Rys. 4. Budynek Landmark Tower w Jokohamie oraz zainstalowany tam tłumik hybrydowy [1]
Fig. 4. Yokohama Landmark Tower and a hybrid damper installed in this building [1]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Na rysunku 4 przedstawiono za [1] schemat konstrukcji tłumika hybrydowego zainstalowanego w Jokohamie na budynku Landmark Tower – najwyższym budynku w Japonii. Strojony tłumik masowy został w tym przypadku zrealizowany w postaci wielostopniowego wahadła. Aktywne siły sterujące generowane są przez silniki elektryczne i przekazywane za pośrednictwem gwintowanych prętów na poruszającą się masę wahadła.

Nieco innym rozwiązaniem konstrukcyjnym tłumików hybrydowych jest tłumik systemu DUOX. Zasadę działania takiego tłumika przedstawiono za [1] na rys. 5. Ruch strojonego tłumika masowego jest moderowany przez ruch dodatkowej (znacznie mniejszej) masy. Ruch masy dodatkowej jest wymuszany za pomocą odpowiednio sterowanego siłownika. Tego rodzaju tłumik zainstalowano na budynku Ando Nishikicho w Tokio.



Rys. 5. Zasada działania tłumika hybrydowego systemu DUOX – budynek Ando Nishikicho w Tokio [1]
Fig. 5. Principle of DUOX system hybrid damper operation – Ando Nishikicho Building in Tokyo [1]

5. Quasi-aktywne układy tłumiące

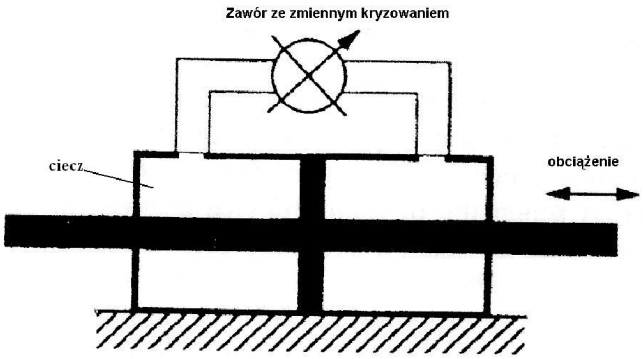
Quasi-aktywne układy tłumiące łączą w sobie wiele korzystnych właściwości układów pasywnych oraz układów aktywnych. W szczególności mogą one dostosowywać się do zmieniającego się obciążenia oraz do zmieniających się właściwości dynamicznych konstrukcji. Nie wymagają one jednak, co jest niezwykle istotne i korzystne, tak dużej mocy zasilania jak układy aktywne stosowane do redukcji drgań budowli. Często tłumiki quasi-aktywne mogą pracować skutecznie, korzystając jedynie z zasilania akumulatorowego. Jest to niezwykle ważne w przypadku wystąpienia nagłych trzęsień ziemi i huraganów, kiedy to zewnętrzne źródła zasilania mogą okazać się zawodne.

Warto również podkreślić, że zastosowanie tych układów nie niesie z sobą zagrożenia destabilizacji pracy całej konstrukcji, jak dzieje się to w przypadku układów aktywnych.

Proste quasi-aktywne urządzenia tłumiące można uzyskać przez zastosowanie w konwencjonalnym tłumiku hydraulicznym dodatkowego kryzowania sterowanego zaworem

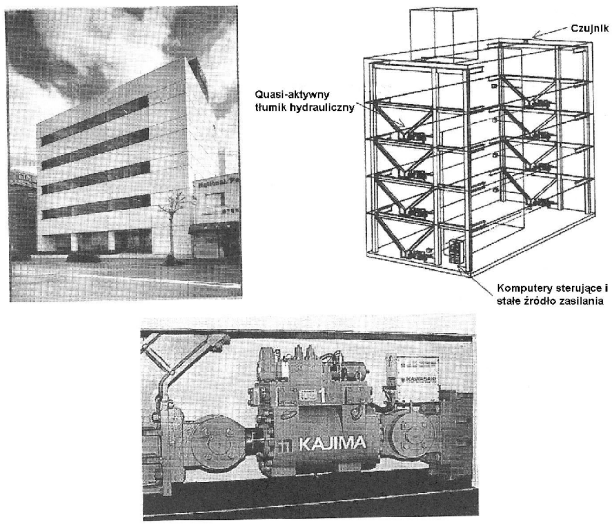
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

elektromechanicznym (zawór taki, sterując przepływem cieczy, powoduje zmianę charakterystyki tłumika). Schemat takiego rozwiązania pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Schemat quasi-aktywnego tłumika hydraulicznego ze zmiennym kryzowaniem sterowanym zaworem elektromechanicznym
Fig. 6. Schematic of semi-active hydraulic damper with controllable, electromechanical variable-orifice valve

Rozwiązanie to zastosowano na początku lat 90. w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej na moście drogowym autostrady I-35. Jest to pierwsze praktyczne zastosowanie tłumika aktywnego na obiekcie w skali naturalnej, w USA [1]. Współczesne zastosowanie tego rodzaju tłumika jako współpracującego z konstrukcją budowlaną pokazano na rys. 7. Quasi-aktywne tłumiki hydrauliczne zainstalowano wewnątrz równoległych ścian po dwóch stronach budynku Kajima Shizuoka w Japonii. Każdy z tłumików może wygenerować maksymalną siłę tłumiącą do ok. 1000 kN.

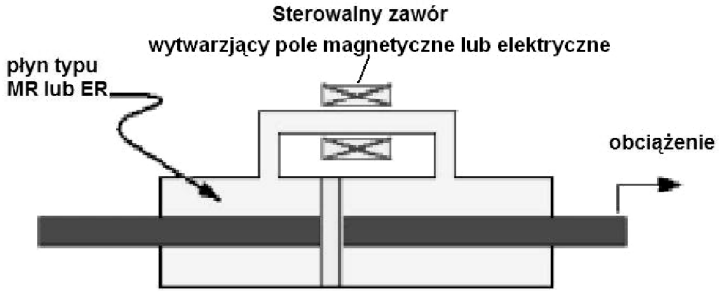


Rys. 7. Budynek Kajima Shizuoka w Japonii oraz zainstalowany tam tłumik quasi-aktywny [1]
Fig. 7. Kajima Shizuoka Building in Japan and semi-active damper installed in this building [1]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Na rysunku 8 podano w ujęciu schematycznym zasadę działania tłumika quasi-aktywnego, w którym stosuje się płyny kontrolowane. Mogą to być płyny elektroreologiczne (ER) albo magnetoreologiczne (MR). Cechą charakterystyczną tych płynów jest to, że mogą one w ciągu milisekund zmieniać swoje właściwości od zwykłego płynu wiskotycznego do ciała quasi-stałego z kontrolowaną granicą plastyczności. Zmianę tę wywołuje w przypadku płynów elektroreologicznych pole elektryczne, zaś w przypadku płynów magnetoreologicznych – pole magnetyczne.

Podane właściwości płynów ER oraz MR zostały po raz pierwszy opisane pod koniec lat 40. XX wieku. Prowadzone później badania dotyczyły jednak głównie płynów ER. Pomimo to wiele praktycznych problemów związanych z zastosowaniem płynów ER nie jest jeszcze rozwiązanych. Przykładowo dostępne na rynku urządzenia tłumiące, w których zastosowano płyny ER, charakteryzują się stosunkowo niską granicę plastyczności ok. 3,0–3,5 kPa.



Rys. 8. Schemat quasi-aktywnego tłumika hydraulicznego z wykorzystaniem kontrolowanych płynów
Fig. 8. Schematic of semi-active hydraulic damper with controllable fluids

Należy tu również odnotować, że niedopuszczalna jest obecność w płynach ER nawet niewielkich zanieczyszczeń (np. wodą), gdyż znacząco wpływa to na zmianę ich właściwości. Zanieczyszczenia takie mogą się – niestety – łatwo do nich dostać zarówno w procesie produkcji, jak i w trakcie eksploatacji. Kolejną wadą tego typu rozwiązań jest duży koszt zapewnienia bezpieczeństwa podczas eksploatacji tłumików. Wymagane jest bowiem stosowanie prądu o wysokim napięciu (nawet ok. 4000 V).

Wszystkie te wady wpłynęły na podjęcie w ostatnim okresie badań nad możliwościami zastosowania w tego typu tłumikach płynów magnetoreologicznych (MR). Zwykle płyny tego rodzaju składają się z mikronowej wielkości magnetycznie spolaryzowanych cząsteczek zawieszonych w płynnym nośniku, jakim jest olej silikonowy lub mineralny. Okazało się, że granica plastyczności płynów MR jest o rząd wielkości wyższa niż płynów ER. Nie zmieniają one swych właściwości w szerokim zakresie temperatur (od –40 do 150 °C) i nie są wrażliwe na najczęściej występujące zanieczyszczenia. Istotną właściwością płynu MR jest to, że może on być kontrolowany z użyciem prądu o stosunkowo niskim napięciu (np. ~12–24 V) i niewielkiej mocy (np. ~50 W). Oznacza to, że w tego typu rozwiązaniach wystarczające może być zastosowanie zasilania akumulatorowego.

Tłumiki wykorzystujące płyn MR zostały zastosowane w 2001 r. w Tokio w budynku Natural Museum of Engineering Science and Innovation. Użyto tam 30-tonowych tłumików MR zainstalowanych pomiędzy 2 a 4 piętrem.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6. Podsumowanie

Od wielu lat stosowane są różnego rodzaju tłumiki współpracujące z budowlami poddanymi działaniom dynamicznym. Ostatnio można zaobserwować znaczący rozwój w tej dziedzinie. Dotyczy to zarówno prac teoretycznych, jak i rozwiązań praktycznych. Szczególnie interesujące są doświadczenia w zakresie praktycznych zastosowań tłumików pasywnych, hybrydowych oraz quasi-aktywnych. Są one coraz częściej stosowane w wielu krajach świata. Pod tym względem wyróżnia się Japonia. Trzeba jednak w tym kontekście zauważyć, że były one głównie projektowane z myślą o zapewnieniu warunków niezbędnego komfortu ludziom przebywającym w budynkach podczas działania intensywnych wiatrów albo umiarkowanych trzęsień ziemi [3]. Skuteczność tych tłumików w przypadku intensywnych trzęsień ziemi wymaga jeszcze potwierdzenia.

Literatura

[1] Chu S.Y., Soong T.T., Reinhorn A.M., *Active, Hybrid, and Semi-active Structural Control. A Design and Implementation Handbook*, John Wiley & Sons Ltd., 2005.

[2] Soong T.T., Spencer Jr B.F., *Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice*, Engineering Structures, 24, 2002, 243-259.

[3] Spencer Jr B.F., Soong T.T., *New applications and development of active, semi--active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA*, Proceedings of International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Cheju, Korea, August 23–25, 1999.

[4] Warburton G.B., *Reduction of Vibrations*, SECED, John Willey & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester West Sussex PO19 IUD, England 1992.

[5] Kwok K.C.S., Samali B., *Performance of tuned mass dampers under wind loads*, Engineering Structures, Vol. 17, No. 9, 1995, 655-667.

[6] Kawecki J., Masłowski R., *Mechaniczne tłumiki drgań współpracujące z masztami z odciągami*, Zeszyty Naukowe, Mechanika, Politechnika Krakowska, Nr 83 „IX Sympozjum Wpływ Wibracji na Otoczenie", Kraków–Janowice 27–30 września 2001.

[7] Kawecki J., Masłowski R., *Examples of application of mechanical vibration dampers mating with tower type structures*, Proceedings of 3rd East European Conference on Wind Engineering, 21–25 May 2002, Kyiv, Ukraine.

[8] Pall AS, Marsh C., *Response of friction damped braced frames*, ASCE, J. Struct. Div., 1208(ST6), 1982, 1313-23.

[9] Pall AS, Pall R., *Friction-dampers used for seismic control of new and existing building in Canada*, Proc. ATC 17-1 Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Active Control., vol. 2, San Francisco 1993, 675-686.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ