

## УДК 539.43

**Клітний Володимир Вікторович**, канд. техн. наук, доц. кафедри «Деталі машин та прикладна механіка». Харківський Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна. Вул. Фрунзе, 21, E-mail: [vlad\\_klitnoy@ukr.net](mailto:vlad_klitnoy@ukr.net)

**СПОСОБИ КОНТРОЛЮ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.**

*У статті дається огляд проблем, пов'язаних з контролем вібрацій будівельних конструкцій. Розглядаються існуючі способи боротьби з вібраціями. Аналізується можливість використання сучасних адаптивних матеріалів у віброзахисних системах.*

**Ключові слова:** гасіння вібрацій, будівельні конструкції, адаптивні матеріали

**Клитной Владимир Викторович**, канд. техн. наук, доц. кафедры «Детали машин и прикладная механика». Харьковский Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина. Ул. Фрунзе, 21, E-mail: [vlad\\_klitnoy@ukr.net](mailto:vlad_klitnoy@ukr.net)

**СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*В статье дается обзор проблем, связанных с контролем вибраций строительных конструкций. Рассматриваются существующие способы борьбы с вибрациями. Анализируется возможность применения различных адаптивных элементов в виброзащитных системах.*

**Ключевые слова:** подавление вибраций, строительные конструкции, адаптивные материалы

**Klitnoi Vladimir**, PhD. tehn. sciences, associate professor at the department of machine parts and applied mechanics. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine. St. Frunze, 21, E-mail: [vlad\\_klitnoy@ukr.net](mailto:vlad_klitnoy@ukr.net)

**CONTROL METHODS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF BUILDING CONSTRUCTION**

*The article gives an overview of the problems associated with the vibration control of structures. Examines existing ways of vibrations suppression. Analyzes the possibility of the application of adaptive elements in the vibration suppression systems.*

**Keywords:** vibration suppression, building construction, adaptive materials

**Введение**

Развитие в рамках прикладной науки проблем динамики сооружений в значительной степени обусловлено быстрым ростом их энергонасыщенности, внедрением современных конструкционных материалов и нестандартных пространственных решений.

Вибрационным нагрузкам подвержены все упругие тела – здания, мосты и сооружения, шины и оборудования, грунты и фундаменты, через которые на значительные расстояния распространяются механические волны. От механических колебаний (вибраций) снижаются прочность, устойчивость и долговечность конструкций, ухудшаются санитарно-гигиенические условия пребывания людей внутри строительных сооружений, нарушается режим работы приборов и автоматических систем, контролирующих технологические процессы в промышленных зданиях. Прогноз и управление вибрационными процессами очень важны при проектировании и эксплуатации строительных конструкций.

При борьбе с отрицательными эффектами вибраций, прежде всего, необходимо определить природу генерации колебательной энергии, потребляемой инженерным сооружением, физико-механические характеристики среды, в которой она распространяется и характер контакта сооружения с энергонесущей средой. В этой связи необходимо провести полный анализ динамических влияний на проектируемые строительные объекты.

Причины возникновения вибраций различны. Некоторые из них вытекают вследствие эксплуатации. Другие – вибрации в окружающей среде (транспорт, установки промышленных предприятий в жилых зданиях и сооружениях – инженерно-технологическое оборудование). Наиболее опасные причины основываются на влиянии редко прогнозируемых внешних факторов, связанных со средой (сейсмическое воздействие, ветер).

Вышеупомянутые многочисленные источники колебаний, которые появляются в процессе эксплуатации строительных конструкций, влияют на их работоспособность. Это

влияние обусловлено появлением периодических, почти периодических, произвольных и случайных, а также импульсных (с затухающими колебаниями) входных возбуждающих сигналов. Кроме того, отрицательное динамическое воздействие является причиной появления источников шума.

Исходя из выше перечисленного, главными целями управления динамическими характеристиками строительных конструкций являются: обеспечение максимально эффективной защиты функционирования сооружений; минимизация нежелательных и вредных эффектов, таких как вибрации элементов строительных конструкций.

К традиционным способам борьбы с отрицательными эффектами вибраций относится повышение жесткости строения за счет увеличения сечения колон, балок, рамно-связевой системы и других элементов конструкций, позволяющих увеличить воспринимаемые строением нагрузки, за счет повышения массы. В результате – стоимость строения значительно возрастает. К недостаткам следует отнести значительное влияние на внутренние средства (устройства) самого сооружения.

Другими, отличными от традиционных, способами является применение методов структурного управления вибрациями. Принцип их работы заключается во внедрении в структуру объекта устройств (механизмов), позволяющих изменять, либо регулировать динамические характеристики всей конструкции. Обычно выделяют четыре группы методов структурного управления вибрациями: пассивные, полуактивные, активные и гибридные.

### Пассивные системы защиты

*Изоляционные системы* – в основном находят применение в строительных сооружениях с целью понижения сейсмических вибраций, либо для понижения шума.

Популярной становится изоляция зданий и мостовых сооружений с помощью различных специальных опор. Так в статье [1] описывается восьмиэтажное здание, поддерживаемое 23-мя резиновыми опорами разного диаметра (рис.1).

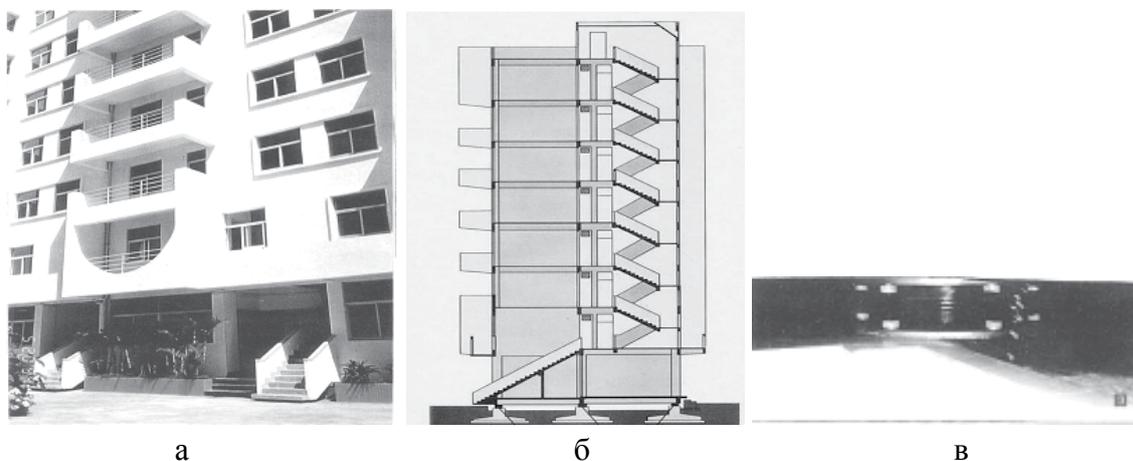


Рис.1. Здание, оснащенное виброизоляционной системой резиновых опор:  
(а – внешний вид здания; б – схематическое изображение;  
в – внешний вид резиновой опоры)

В работе [2] представлены исследования композитных сейсмоизоляционных опор, используемых в мостовых сооружениях. Понижение вибраций и шумовых эффектов железнодорожного моста с помощью изоляционной системы описывается в статье [3].

*Рассеивающие энергию системы* создаются путем внедрения в структуру сооружений гасителей энергии. За счет этого рассеивается большая часть негативной вибрационной энергии и повышается надежность и безопасность функционирования строительной конструкции.

Среди большого числа демпферов можно отметить стальные демпфирующие элементы, обычно изготавливаемые из мягкоуглеродистой стали (рис. 2).

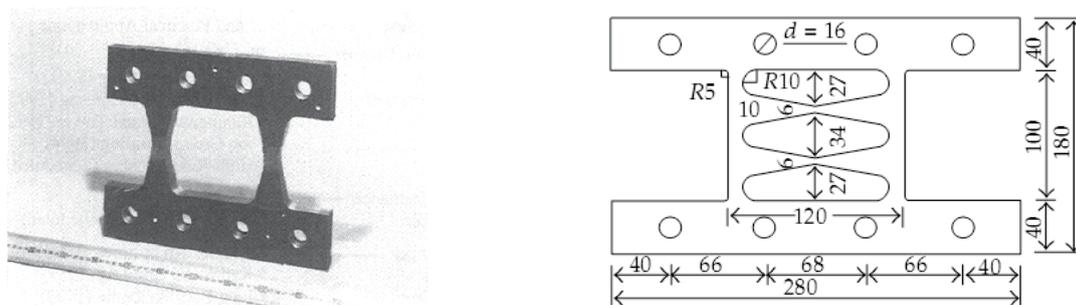


Рис.2. Различные типы металлических демпферов [1, 4].

Стальные демпферы отличаются простотой и относительной дешевизной изготовления. На рис. 3 представлены несколько способов интегрирования стальных демпферов в структуру здания [4].



Рис. 3. Способы интегрирования стальных демпферов в структуру здания

Широкое применение находят: фрикционные демпферы, с простой механической конфигурацией и изготавливаемые из обычных материалов (рис. 4, а [1]); вязкоупругие демпферы, позволяющие защищать сооружения как от сейсмического воздействия, так и от влияния ветра (рис. 4, б [5]); жидкостные демпферы, схожие по характеристикам с вязкоупругими (рис. 4, в [1])

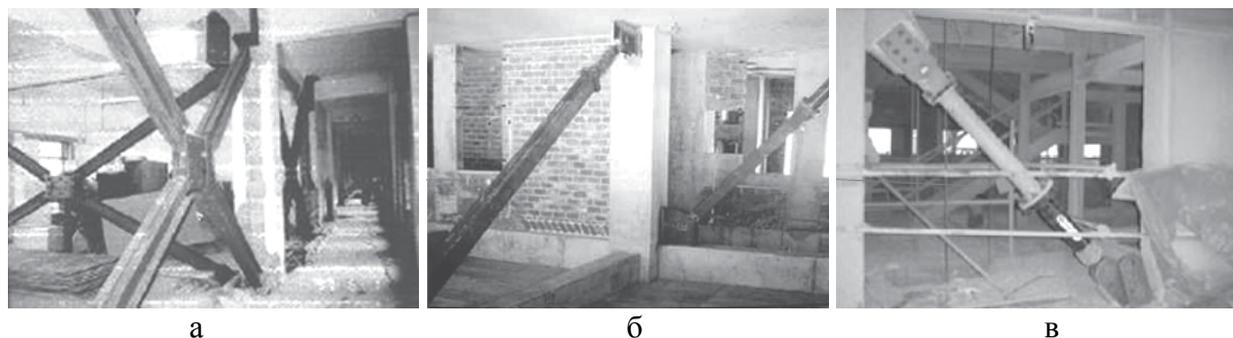


Рис. 4. Виды демпферов

#### Активные системы управления

Идея активных методов подавления вибраций состоит во вводе в систему дополнительного источника энергии. Такое решение задачи позволяет ввести некоторые локальные силы, которые компенсируют влияние колебаний на систему. В результате, задачу управления вибрациями можно рассматривать как задачу оптимального управления всей системой в целом.

В связи с этим имеет место определенный интерес к рассмотрению развивающихся в последние годы адаптивных конструкций, характеризующихся интегрированными сенсорами и актуаторами, связанными между собой посредством управляющего органа (контроллера).

С помощью сенсоров снимается информация о состоянии конструкции и далее передается на контроллер, который обрабатывает полученную с сенсоров информацию и вырабатывает сигнал отклика, поступающий на актуаторы. Сами же актуаторы обеспечивают непосредственное механическое воздействие на конструкцию. Они конвертируют (преобразовывают) поступающий сигнал (электрический, гидравлический, пневматический, термический и т.д.) в механический (силы, перемещения).

На рис. 5 представлено здание, оснащенное активной системой защиты [6]. Два массовых управляющих элемента (A1, A2), следящий элемент (акселерометр) и управляющий прибор расположены на крыше здания. Схема контроля построена на принципе схем с обратной связью. Здание оснащено сейсмической обсерваторией и анемометром, данные с которых позволяют анализировать эффективность системы защиты.

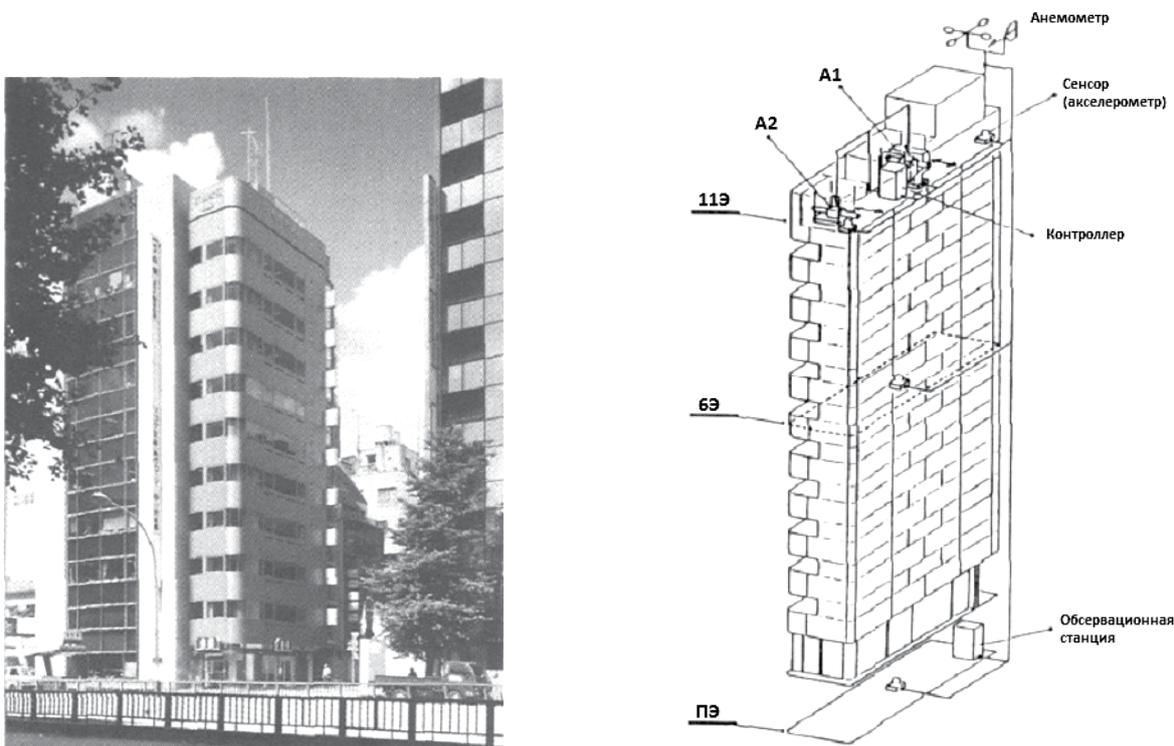


Рис. 5. Фотографический снимок и схематическое изображение здания, оснащенного схемой активного управления вибрациями

### Полуактивные системы управления

Таким системам присущи адаптивные свойства активных схем управления вибрациями (активное изменение параметров конструкции) и стабильность, характеризующая пассивные системы. Важным преимуществом таких систем является малая энергозависимость (энергия необходима только для функционирования управляющего прибора и не больших электрических устройств, модифицирующих механические характеристики).

Интересна разработка здания, оснащенного полуактивной системой управления, представленного на рис. 6 [6, 7]. В данном случае адаптивная система распознает и обрабатывает внешние воздействия. Когда вибрации от внешних возмущающих факторов подвергают опасности структурную целостность конструкции, происходит активное изменение жесткости строительных элементов. Таким образом, происходит смещение собственной частоты конструкции и происходит отстройка от резонанса.

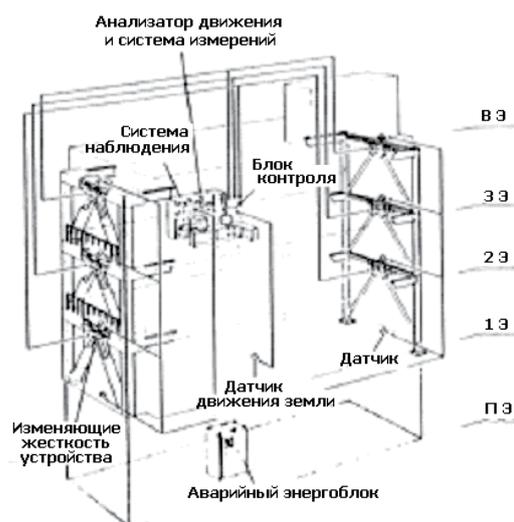
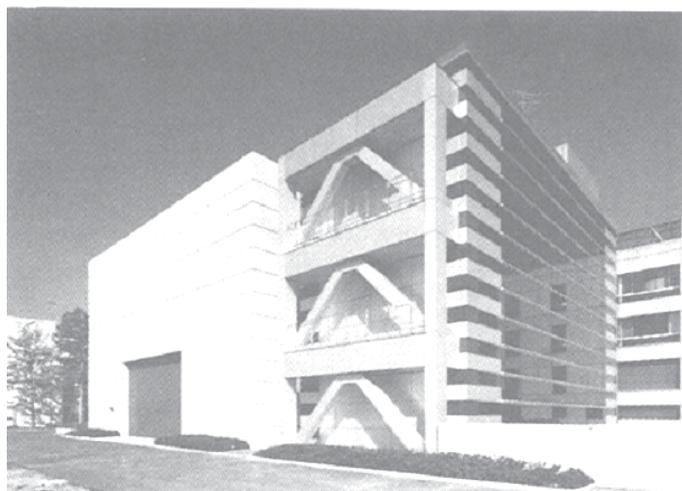


Рис.6. Фотографический снимок и схема здания, оснащенного полуактивной защитой от землетрясений с помощью переменной жесткости строительных элементов

### Гибридные системы управления

Гибридные системы представляют собой комбинацию активных систем управления и пассивных систем защиты. Обычно в таких системах используется не большая (с малыми габаритами и энергозатратами) активная система контроля в сочетании с пассивными системами защиты (рис. 7).

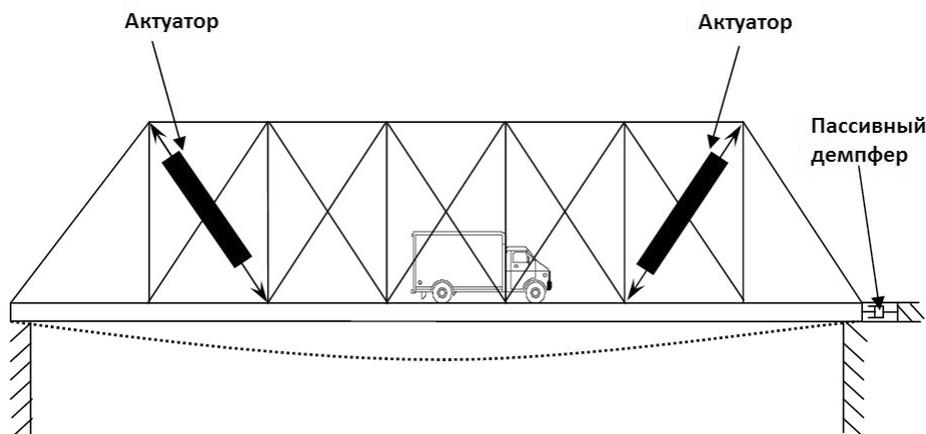


Рис. 7. Пример использования гибридной системы управления вибрациями

### Адаптивные материалы в системах управления

В адаптивных структурах, основной целью которых является активный контроль вибраций, находят применение различные виды актуаторов. Обычно выделяют следующие типы: электродинамические, пневматические, гидравлические, электромагнитные и актуаторы, выполненные на базе адаптивных материалов.

Термин «адаптивные материалы» включает в себя большое количество разнообразных материалов, обладающих свойствами актуаторов. Такие материалы способны изменять свои механические свойства (вязкость, жесткость, форму) под влияниями температурного изменения, электрического или магнитного полей.

При рассмотрении адаптивных материалов можно выделить материалы, которые непосредственно конвертируют внешне приложенное электрическое или магнитное воздействия в механическое, или, наоборот, преобразовывают механическое воздействие в электрическое или магнитное путем прямого физического эффекта на микроструктурном

уровне. К такому классу материалов относятся пьезо и электрострикционная керамика, пьезоэлектрические полимеры и магнитоэлектрические сплавы.

Пьезокерамические элементы являются твердотельными, характеризуются высокой помехозащищенностью, малым уровнем собственных шумов, повышенной радиационной стойкостью. Керамическая технология изготовления пьезоэлементов не накладывает принципиальных ограничений на их форму и размеры. Эти обстоятельства, а также высокие значения пьезоэлектрических характеристик, обусловили широкое применение керамических пьезоэлементов в технике, а также в адаптивных системах подавления вибраций в качестве актуаторов.

Так в статье [8] исследуется возможность управления вибрациями строительных моделей с помощью управляемых изгибающих моментов вырабатываемых пьезоэлектрическими актуаторами (рис. 8).

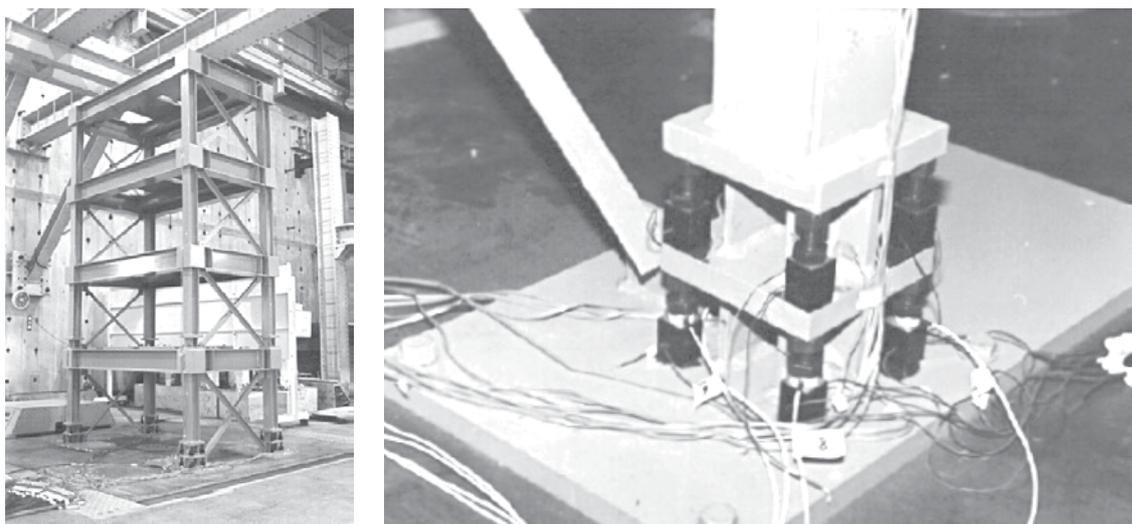


Рис. 8. Строительная модель с закрепленными на ней пьезоэлектрическими актуаторами

Под электрострикционной керамикой обычно понимаются материалы на основе свинцового ниобата магния (в зарубежной литературе PMN). Хотя электрострикционные материалы эффективны при работе на высокочастотных динамических режимах, но из-за высокой термочувствительности они имеют значительно меньшее практическое применение, чем пьезокерамика.

Из магнитоэлектрических сплавов также изготавливаются актуаторы, активно используемые в строительных конструкциях для подавления вибраций. Такие актуаторы вырабатывают силы значительно выше, чем аналогичные пьезокерамические, но вес их в 10-20 раз больше. На рис. 9 представлен один из многих вариантов использования такого типа актуаторов в системах управления [1].

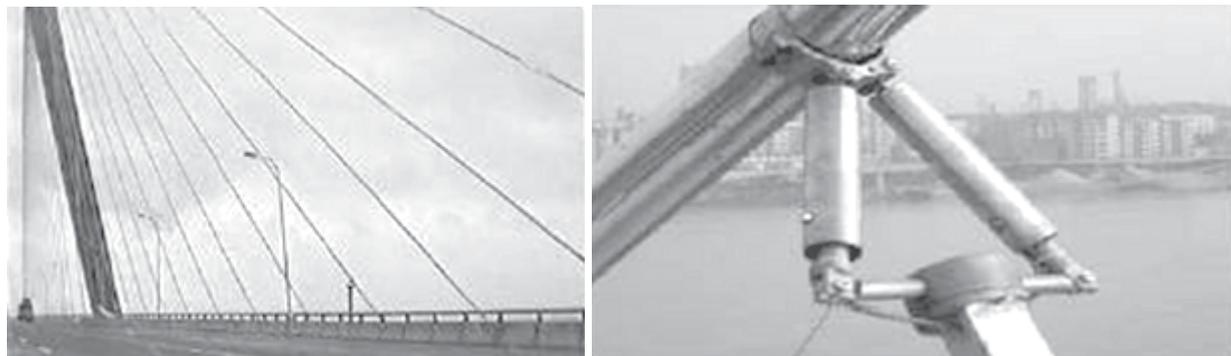


Рис. 9. Мост с магнитоэлектрическими актуаторами

Среди адаптивных материалов следует выделить сплавы с памятью формы. Актуаторы, выполненные из таких сплавов, производят механическое воздействие через металлургическое преобразование фазы, вызванное переходом некоторых температурных порогов.

В настоящее время проводятся активные разработки новых перспективных материалов. Так в работе [9] рассматривались монокристаллы PZN-PT ( $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$ ). Было показано, что уровень деформирования в таких кристаллах достигает 1,5 %. Следует отметить, что максимальный уровень деформирования пьезокерамики составляет 0,12 %–0,18 %. Как видим, выходные значения этих новых материалов могут быть на порядок выше, чем у используемых на данный момент пьезокерамических материалов. Однако следует принимать во внимание сильную зависимость их пьезоэлектрических свойств от ориентации кристалла. Это вызывает ощутимые трудности при проектировании по сравнению с пьезокерамикой.

### Вывод

Исследования в области контроля динамических характеристик строительных конструкций показывают свою состоятельность и перспективность. Активное развитие адаптивных материалов и новых технологий открывает широкие возможности в дальнейшем применении адаптивных систем управления.

### Список использованной литературы

1. Hongnan Li, Linsheng Huo *Advances in Structural Control in Civil Engineering in China* / Li Hongnan, Huo Linsheng // *Mathematical Problems in Engineering* – 2010. – 23 p.
2. Behaviour of Composite Bearings Used in Bridge Isolation / [G. Gillich, P. Bratu, M. Raduca, D. Amariei, V. Iancu] // 5th International Vilnius Conference, “Knowledge-Based Technologies and OR Methodologies for Strategic Decisions of Sustainable Development”, 2009. – P. 489–494.
3. Noise and vibration control of the south railway bridge of Budapest / [F. Augusztinovicz, F. Márki, P. Carels, M. Bite, I. Dombi] // 10th international congress on sound and vibration, 2003. – P. 1713-1720.
4. Li H.-N., Li G., Experimental study of structure with “dual function” metallic dampers / H.-N. Li, G. Li // *Engineering Structures*, vol. 29. – no. 8. – 2007. – P. 1917–1928.
5. Cheng W., Sui J., Chen Y., и др. Design and earthquake absorption using viscoelastic damper in transportation building of Suqian city / W. Cheng, J. Sui, Y. Chen, et al. // *Journal of Building Structures*. – vol. 21. – no. 3. – 2000. – P. 30–35.
6. Sakamoto M., Kobori T. Research, development and practical applications on structural response control of buildings / M. Sakamoto, T. Kobori // *Smart Mater. – Struct.* 4. – 1995. – P. 58-74.
7. Giurgiutiu V. Actuators and smart structures / V. Giurgiutiu // *Encyclopedia of vibrations*, S.G. Braun (Editor-in-Chief), ISBN 0-12-227085-1 – Academic Press, 2001. – P. 58–81.
8. Kamaday T., Fujitay T., Hatayamaz T. и др. Active vibration control of framestructures with smart structures using piezoelectric actuators (Vibration control by control of bending moments of columns) / T. Kamaday, T. Fujitay, T. Hatayamaz и др. // *Smart Mater. – Struct.* 6. – 1997. – P. 448–456.
9. Thick-film printing of PZT onto silicon / [R. Maas, M. Koch, N. R. Harris, N. M. White, A.G.R. Evans] // *Mater. Lett.* – 1997. – vol. 31. – P. 109-112.

Поступила в редакцию 24.09 2014 г.