

## Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях

*Д.т.н., профессор М.Г. Мелкумян\*,  
“Центр новых строительных технологий”, АОТ “Армпроект”*

**Ключевые слова:** динамический гаситель колебаний; сейсмические воздействия; гармонические колебания; модель здания; вибрационные испытания; настройка гасителя; эффективность гасителя

Теоретическому изучению поведения зданий с динамическими гасителями колебаний при различных воздействиях посвящено достаточно большое количество исследований [1, 2, 3, 4]. Однако экспериментальные работы в этом направлении весьма ограничены. Две работы, выполненные путем натурных вибрационных испытаний 9-этажных жилых зданий серии 111, оснащенных динамическими гасителями колебаний в виде гибкого верхнего этажа (ГВЭ) и изолированного верхнего этажа (ИВЭ), в г. Ванадзоре (бывший Кировакан) в Армении, описаны автором данной статьи в [5, 6, 7, 8].

Настоящая работа в определенной степени восполняет недостаток экспериментальных исследований, направленных на изучение поведения зданий с динамическими гасителями колебаний. Исследования проведены на модели 9-этажного каркасного здания той же серии 111. Модель была спроектирована и сооружена автором в масштабе 1:5 из железобетона [9] с использованием принципа простого подобия, разработанного в [10]. Она имела в плане девять колонн, образующих по два пролета (120 см) во взаимоперпендикулярных направлениях, с общими осевыми размерами 240x240 см. В одном направлении пространственная жесткость модели обеспечивалась работой трех рам с несущими ригелями (по рамной схеме), а в другом – работой трех рам со связевыми ригелями и одной вертикальной диафрагмой жесткости, расположенной в одном из пролетов в плоскости средней рамы (по связевой схеме). Сечения колонн были 8x8 см, несущих ригелей – 8x10.4(h) см и связевых ригелей – 8x5(h) см. Толщина перекрытий, состоящих из сборных круглопустотных модельных панелей, была равна 4.4 см, а сборных панелей диафрагмы жесткости – 2.8 см. В соответствии с конструктивным решением зданий серии 111, панели диафрагмы крепились к колоннам путем сварки закладных деталей, а их связь с ригелями осуществлялась замоноличиванием арматурных выпусков, выведенных из тела сборных панелей диафрагмы. Общая высота модели, при высоте каждого этажа 0.6 м, высоте фундаментных балок 0.4 м, а также стальных оголовников колонн, выступающих над перекрытием 9-го этажа на 0.1 м, была равна 5.9 м.

Внешний вид модели до устройства над ней динамических гасителей колебаний показан на рис. 1, откуда видно, что для создания необходимого уровня напряженно-деформированного состояния в конструктивных элементах модели последняя нагружалась вертикальными силами путем подвески чугунных грузов к ее перекрытиям. Более детальная информация о проектировании, сооружении и испытаниях данной модели без динамических гасителей колебаний может быть найдена в многочисленных работах автора настоящей статьи, которые здесь для краткости не приводятся.

Колебания модели до устройства гасителей возбуждались в обоих направлениях с помощью специально разработанных и изготовленных автором для модельных испытаний лабораторных вибромашин, установленных на перекрытии девятого этажа. Вибромашин жестко крепились к стальной раме, которая в свою очередь была приварена к стальным оголовникам всех девяти колонн модели (рис. 2). Вибромашин устанавливались так, чтобы возмущающие силы, возникающие при вращении эксцентрично расположенных грузов на валах вибраторов, действовали в вертикальных плоскостях, проходящих по средним осям (рамам) модели во взаимоперпендикулярных направлениях. Специальным устройством обороты двигателей постоянного тока вибромашин плавно регулировались, чем и обеспечивалось получение гармонических воздействий в диапазоне частот от 0 до 10 Гц. Для измерения параметров виброколебаний использовались сейсмографы больших перемещений и акселерографы, установленные на уровне всех перекрытий вдоль центральной вертикальной оси модели, за исключением приборов на перекрытии девятого этажа. Здесь, из-за наличия вибромашин, сейсмоприборы были установлены вне центральной зоны плана модели.

Мелкумян М.Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях

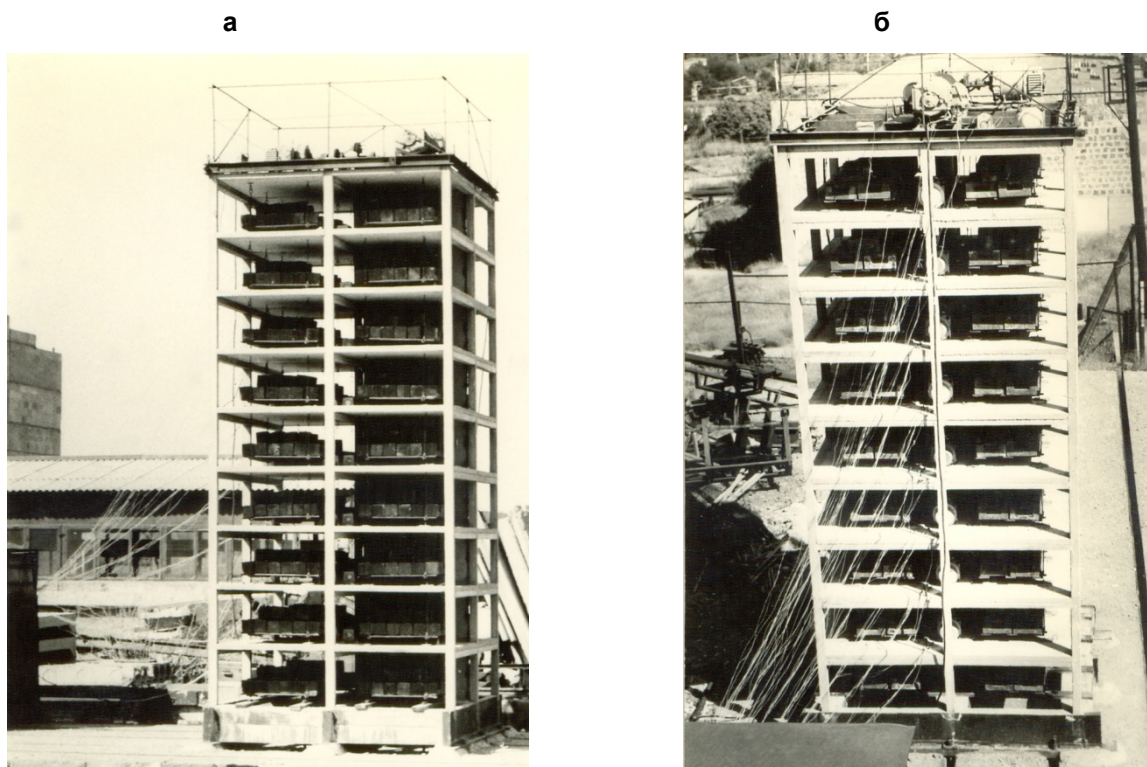


Рисунок 1. Модель 9-этажного каркасного здания серии 111, спроектированная и сооруженная из железобетона в масштабе 1:5: а – вид спереди, б – вид сбоку

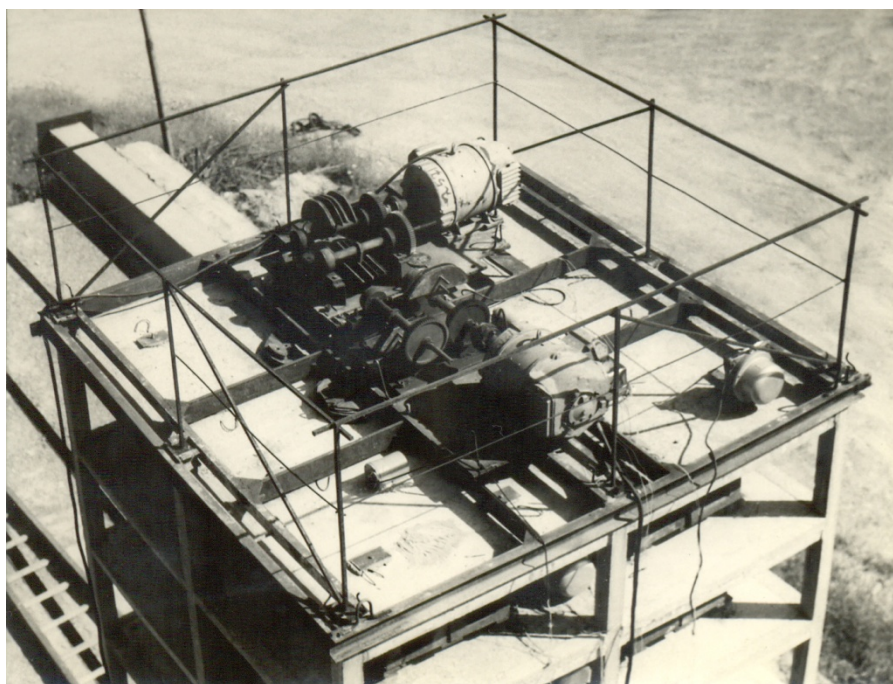


Рисунок 2. Лабораторные вибромашины для испытаний крупных моделей, установленные на перекрытии девятого этажа (до устройства гасителей) посредством стальной рамы, жестко закрепленной к стальным оголовникам колонн модели 9-этажного каркасного здания

Выше упоминалось о проведенных натурных вибрационных испытаниях 9-этажных жилых зданий серии 111, оснащенных динамическими гасителями колебаний в виде ГВЭ или ИВЭ. Эти системы представляли собой одномассовые гасители колебаний. В данной же экспериментальной работе предметом исследований является двухмассовый динамический гаситель колебаний. До устройства такого гасителя в виде дополнительного десятого этажа предварительно определялись динамические характеристики модели (периоды и коэффициенты затухания). С

Мелкумян М.Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях



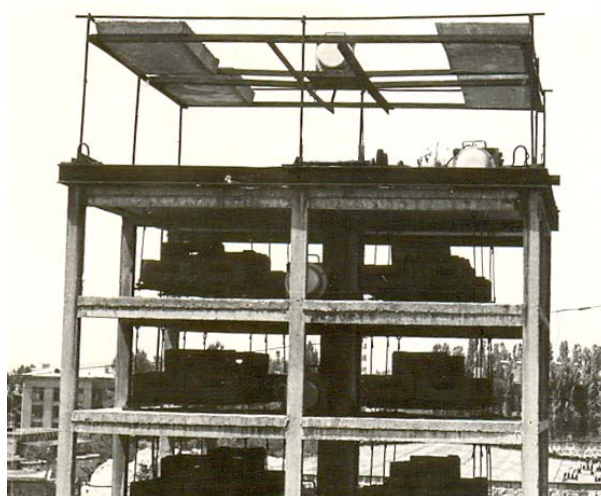
помощью вибромашины возбуждались вынужденные резонансные колебания модели по первой, второй и третьей формам. Вычисленные по записям этих колебаний значения периодов и коэффициентов затухания даны в Таблице 1.

**Таблица 1. Периоды колебаний и коэффициенты затухания модели 9-этажного каркасного здания в стадии упругой работы при возбуждении резонансных колебаний по первым трем формам до устройства двухмассового динамического гасителя колебаний**

Направление испытаний	Периоды колебаний, сек			Коэффициент затухания $\xi$ , %
	по первой форме – $T_1$	по второй форме – $T_2$	по третьей форме – $T_3$	
Вдоль рам с несущими ригелями (рамная схема)	0.326	0.133	0.075	4.3
Вдоль рам со связевыми ригелями (связевая схема)	0.280	0.088	0.049	4.0

Экспериментальные исследования модели 9-этажного каркасного здания с двухмассовым динамическим гасителем колебаний предполагалось проводить при ее нагружении только в направлении рам со связевыми ригелями и с диафрагмой жесткости, расположенной в одном из пролетов в плоскости средней рамы. В связи с этим одна из вибромашин была демонтирована. В данном направлении, с целью достижения стадии трещинообразования, модель подверглась нескольким этапам динамического нагружения с постепенным увеличением веса внецентренных грузов на валах вибратора. При этом в панелях вертикальной диафрагмы жесткости появились легкие повреждения в виде наклонных волосяных взаимнопересекающихся трещин, а период колебаний основного тона модели увеличился по отношению к первоначальному в 1.25 раз и оказался равным 0.35 сек ( $\omega_1=2.86$  Гц). Коэффициент затухания практически не изменился ( $\xi=4\%$ ), а амплитуда перемещения перекрытия 9-го этажа была равна  $A=3.1$  см.

Полученные величины легли в основу подбора параметров, а именно массы и жесткости первого гасителя, названного автором основным. Оказалось, что для обеспечения требуемой горизонтальной жесткости упомянутого выше дополнительного десятого этажа – основного гасителя – его стойки могут быть металлическими, выполненными из квадратного железа сечением 14x14 мм, приваренными к торцам стальных оголовников колонн 9-этажной модели. При этом жесткость перекрытия модельного основного гасителя может быть обеспечена уголковыми профилями из прокатной стали размером 45x45x4 мм, а его масса может набираться посредством железобетонных плит, укладываемых на эти уголковые профили (рис. 3). Таким образом, созданная над 9-этажной моделью конструкция основного гасителя аналогична ГВЭ, проект которого был разработан автором данной статьи, а затем реализован и испытан при его непосредственном участии [6, 11].



**Рисунок 3. Фрагмент верхней части 9-этажной модели с видом дополнительного десятого этажа – основного гасителя с уложенными железобетонными плитами, образующими его массу**

В процессе исследований преследовалась цель выявить эффективность и демпфирующие свойства двухмассового гасителя и сравнить их с эффективностью одномассового гасителя. Вопрос о выборе оптимального затухания в гасителе не ставился. Настройка основного гасителя  $f_1^2 = f_{ог}^2 \cdot \omega_1^2$  (без учета демпфирования [12]) производилась непосредственно на модели. Первоначально основной гаситель настраивался на частоту  $f_{ог}$ , очень близкую к резонансной частоте первой формы колебаний модели  $\omega_1$ . Потом с помощью дискретного изменения массы гасителя определялась оптимальная настройка [13], при которой достигается максимальная эффективность гашения. Оказалось, что оптимальная настройка предполагает набор массы основного гасителя до величины, равной  $m_{ог}=360$  кг, что составило половину массы этажа модели (без пригрузов)  $m_э=720$  кг. Следовательно, учитывая, что общая масса девяти этажей модели

равна  $M_m=720 \times 9=6480$  кг, относительная масса  $\nu=m_{ог}:M_m=360:6480=0.056$  (или 5.6%), а настройка  $f_1^2=1.0$ .

С учетом демпфирования подход к оптимизации параметров динамических гасителей отличается от случая гасителей без демпфирования, так как определяются оптимальные значения настройки и относительного коэффициента вязкого (или неупругого) сопротивления при заданном значении  $\nu$ . Оптимальные значения настройки по гипотезам вязкого сопротивления или внутреннего неупругого сопротивления определяются одним и тем же путем [12, 14]. В нашем случае оптимальная настройка с учетом демпфирования отличается от величины  $f_1^2$  и определяется по формуле:

$$f_{on}^2 = \frac{1}{1+\nu} = \frac{1}{1.056} = 0.95.$$

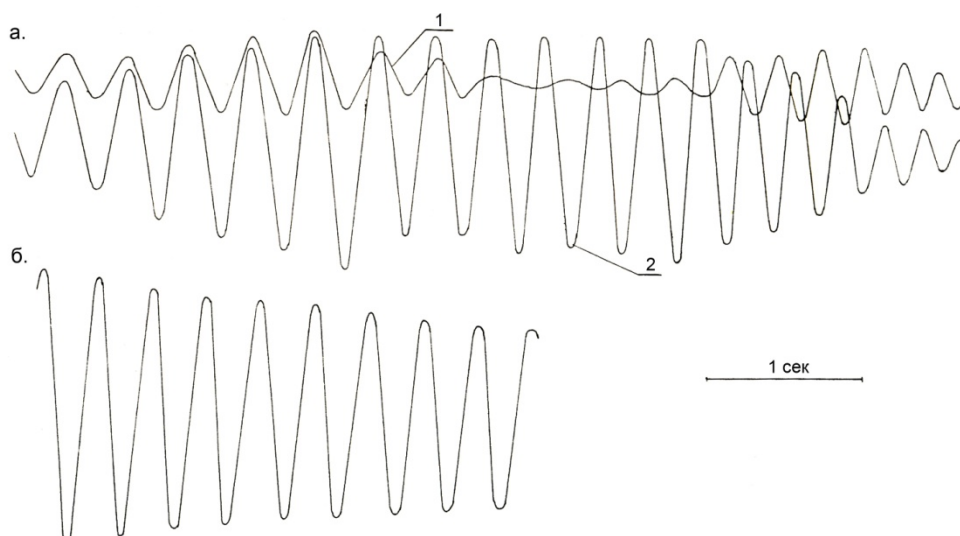
После настройки основного гасителя модель подверглась динамическому нагружению с переменной частотой. Фрагменты записей колебаний, полученных при вибрационных резонансных испытаниях сейсмоприборами, установленными на перекрытии девятого этажа модели и на уровне верха основного гасителя, приведены на рис. 4а. Из зарегистрированных записей видно, что максимальная амплитуда колебаний верха модели с основным гасителем составляет 1.05 см, что почти в 3 раза меньше [15, 16], чем ее амплитуда без гасителя (3.1 см). При этом максимальные амплитуды верха модели с гасителем, которые до и после прохождения через резонанс были примерно равны по величине, соответствовали частотам 2.5 Гц и 3.3 Гц, почти симметрично расположенным относительно резонансной частоты модели без гасителя (2.86 Гц). Следует отметить, что до прохождения через резонанс гаситель работал софазно с моделью, а после прохождения через резонанс – в противофазе. При этом амплитуда колебаний основного гасителя была примерно в 3÷4 раза больше амплитуды колебаний верха модели. Записывались также и свободные колебания основного гасителя, имеющего оптимальную настройку (рис. 4б). Определенный по этой записи коэффициент затухания основного гасителя был равен  $\xi=0.7\%$ .

По окончании испытания модели с основным гасителем к перекрытию последнего была подвешена вторая масса, и, тем самым, гаситель из одномассового был преобразован в двухмассовый. Вторая масса гасителя могла набираться грузами, укладываемыми в металлический ящик, имеющий размеры 30х40х10 см и массу 10 кг. Металлический ящик был подвешен к перекрытию основного гасителя посредством стержней из круглой стали диаметром 8 мм и длиной 30 см. Внешний вид подвешенной второй массы показан на рис. 5. Настройка, или иными словами подбор оптимальной величины второй массы, производилась аналогично настройке основного гасителя. При оптимальной настройке подвешенная вторая масса гасителя оказалась равной 40 кг, а парциальная частота собственных колебаний 2.65 Гц. Относительные массы и настройки двухмассового гасителя соответственно были равны:

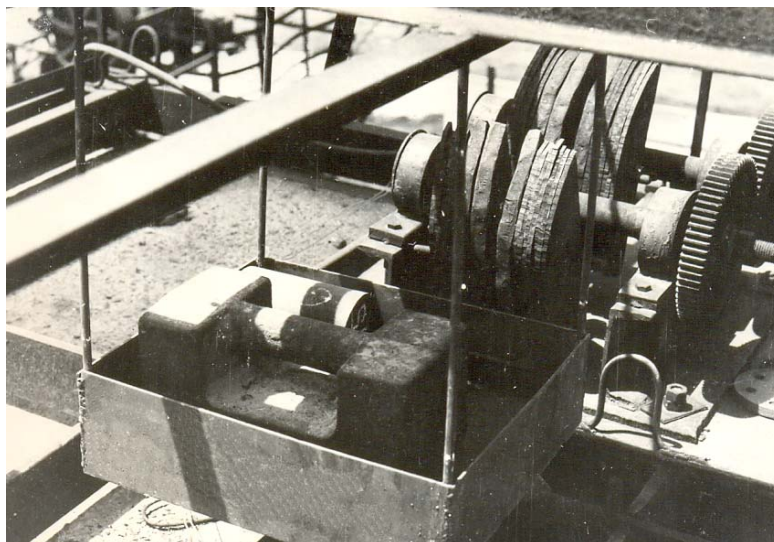
$$\nu_{\Gamma} = \frac{m_{\Gamma 1} + m_{\Gamma 2}}{M_m} = \frac{360 + 40}{9 \times 720} = 0.0617;$$

$$f_1^2 = 1.0; f_2^2 = 0.93; \nu_2 = \frac{m_{\Gamma 2}}{m_{\Gamma 1}} = \frac{40}{360} = 0.11$$

При этом общая масса двухмассового гасителя получилась на 11% больше одномассового.



**Рисунок 4. Фрагменты записей колебаний на уровне верха 9-этажной модели с одномассовым гасителем (1) и колебаний на уровне верха гасителя (2) при динамическом нагружении, создаваемом вибромашинной (а), а также фрагмент записи свободных колебаний одномассового гасителя (б)**

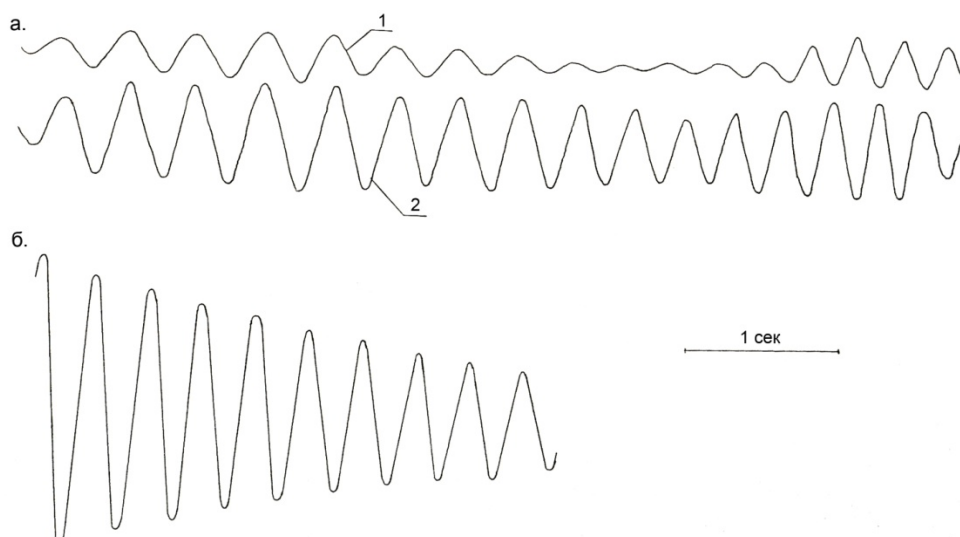


**Рисунок 5. Фрагмент верхней части 9-этажной модели с видом подвешенной к основному гасителю второй массы, создаваемой грузами, уложенными в металлический ящик**

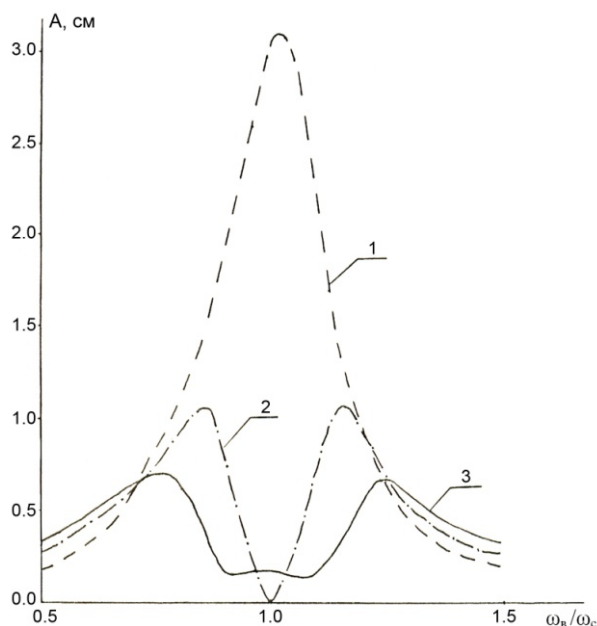
После настройки полученной системы гасителя были сделаны контрольные записи колебаний модели с двухмассовым гасителем, опять же, при гармоническом воздействии с переменной частотой. Записи этих колебаний приведены на рис. 6. По этим записям, а также по записям, показанным на рис. 4, были построены амплитудно-частотные характеристики модели (рис. 7). Из полученных результатов видно, что двухмассовый гаситель эффективнее одномассового, так как коэффициент гашения при двухмассовом гасителе достигает примерно 4.4, что на 46.7% больше по сравнению с одномассовым. Кроме того, примерно на 50% расширяется зона гасимых частот. Эти результаты получились даже несколько большими, чем ожидаемые.

Из сравнения рис. 4 и 6 видно, что амплитуды колебаний одномассового основного гасителя значительно уменьшились. Если до подвески к нему второй массы максимальная амплитуда одномассового гасителя составляла примерно 3.5 см, то после подвески второй массы она оказалась равной 1.4 см. Запись свободных колебаний двухмассового гасителя показала, что его коэффициент затухания  $\xi=1,75\%$ , что в 2.5 раза больше по сравнению с одномассовым. Увеличение коэффициента затухания двухмассового гасителя объясняется, по-видимому, взаимовлиянием основного и подвешенного к нему второго гасителей, обусловленным перераспределением энергии при колебаниях. Таким образом, при гармонических колебаниях, возбуждаемых вибрационной машиной, была выявлена более высокая эффективность двухмассового гасителя по сравнению с одномассовым.

Мелкумян М.Г. Исследование эффективности одно- и двухмассового динамического гасителя колебаний на модели каркасного здания при вибрационных испытаниях



**Рисунок 6. Фрагменты записей колебаний на уровне верха 9-этажной модели с двухмассовым гасителем (1) и колебаний на уровне верха гасителя (2) при динамическом нагружении, создаваемом вибромашинной (а), а также фрагмент записи свободных колебаний двухмассового гасителя (б)**



**Рисунок 7. Амплитудно-частотные характеристики 9-этажной модели без гасителя (1), с одномассовым гасителем (2) и с двухмассовым гасителем колебаний (3)**

Резюмируя изложенное выше, можно констатировать, что проведенные экспериментальные исследования подтверждают достаточно высокую эффективность динамических гасителей колебаний и бесспорную целесообразность их применения для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений [17, 18]. Решение вопроса о применении того или иного типа гасителя в зависимости от количества масс (одно-, двух- или многомассового) или в зависимости от конструктивной схемы (ГВЭ или ИВЭ и др.) в верхней части реальных зданий зависит от многих факторов. К ним можно отнести:

- этажность;
- конструктивное решение и техническое состояние зданий;
- обстоятельства, ограничивающие перемещения гасителя;
- необходимость устройства гасителя при продолжении эксплуатации зданий;
- необходимость эксплуатации пространства, образуемого внутри самого гасителя;
- экономичность гасителя и много других факторов.



## Литература

1. Nawrotzki P. Strategies for the Seismic Protection of Structures // Proceedings of the 8<sup>th</sup> World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. Yerevan, Armenia, 2003. Pp. 48-58.
2. Palazzo B., Petti L., De Luliis M. A Passive Robust Control Strategy: Base Isolation and Tuned Mass Damping // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Structural Control. Vienna, Austria, 2004. Pp. 51-210.
3. Taniguchi T., Der Kiureghian A., Melkumyan M. Effect of Tuned Mass Damper on Displacement Demand of Base-Isolated Structures // Engineering Structures. 2008. No. 12, Vol. 30. Pp. 3478-3488.
4. Fujitani H., Saito T. Devices for Seismic Isolation and Response Control // Response Control and Seismic Isolation of Buildings. Taylor & Francis, 2006. Pp. 193-248.
5. Melkumyan M. G. Dynamic Tests of the 9-story R/C Full-scale Building with an Additional Isolated Upper Floor Acting as Vibration Damper // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Structural Dynamics: EURO-DYN'96, Florence, Italy, 1996. Vol. 1. Pp. 557-560.
6. Мелкумян М. Г. Опыт применения современных систем сейсмозащиты // Трагедия Спитака не должна повториться. Ереван: Воскан Ереванци, 1998. С. 193-205.
7. Melkumyan M. G. Base and Roof Isolation for Earthquake Retrofitting and Protection of Existing Buildings in Armenia // Proceedings of the International Symposium on Seismic Risk Reduction (the JICA Cooperation Project in Romania). Bucharest, Romania, 2007. Pp. 593-600.
8. Melkumyan M. G. New Solutions in Seismic Isolation. Yerevan: LUSABATS, 2011. 264 p.
9. Мелкумян М. Г. Формирование динамических расчетных моделей при анализе сейсмической реакции железобетонных зданий и их новые конструктивные решения. Ереван: Ереван, 1993. 100 с.
10. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван: Изд-во Академии Наук Арм. ССР, 1965. 218 с.
11. Minassian A. Ts., Melkumyan M. G., Khachian E. E. Testing of 9-storey Frame-panel Building (series 111) Having a Seismic Protection System in the Form of an Additional Flexible Upper Floor Acting as Vibration Damper // Abstracts of the International Conference "Continental Collision Zone Earthquakes and Seismic Hazard Reduction". Yerevan-Sevan, Armenia, 1993. Pp. 60-61.
12. Корнев Б. Г., Резников Л. М. Расчет сооружений, оборудованных динамическими гасителями колебаний // Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1981. С. 149-175.
13. Yoshizumi F., Sano K-i., Inoue H. Optimum Robust Design for Multi-TMD Systems Composed of a Few Dampers // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Structural Control. Como, Italy, 2003. Vol. 3. Pp. 735-740.
14. Warburton G. Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1982. No. 10. Pp. 381-401.
15. Makino A., Imamiya J., Sahashi N. High-rise Building Seismic Vibration Control Using Large Tuned Top-floor Mass Damper // Proceedings of the JSSI 15<sup>th</sup> Anniversary International Symposium on Seismic Response Controlled Buildings for Sustainable Society. Tokyo, Japan, 2009. Paper RC-15. Pp. 42-51.
16. Shooshtari A., Afzali H. Effects of TMD System on 15-story R/C Frame Response under Ground Excitation // Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering. Ohrid, Republic of Macedonia, 2010. Paper No. 797.
17. Chang K-Ch., Hwang J-Sh., Wang Sh-J. Applications of Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems to Buildings in Taiwan // Proceedings of the JSSI 15<sup>th</sup> Anniversary International Symposium on Seismic Response Controlled Buildings for Sustainable Society. Tokyo, Japan, 2009. Paper OS-7. Pp. 42-51.
18. Dorka U. E. Towards a Safety Concept for Buildings with Structural Control // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Structural Control. Paris, France, 2000. Pp. 127-140.

\* *Микаел Григорьевич Мелкумян, Ереван, Армения*

*Тел. моб.: (37491)94-54-02; эл. почта: mmelkumi@yahoo.com*

© Мелкумян М.Г., 2012

doi: 10.5862/MCE.31.3

# Investigation of the effectiveness of single-mass and two-mass dynamic oscillation dampers on the model of frame building under the vibration testing

**M.G. Melkumyan,***“Center of New Construction Technologies” of “Armproject” OJSC, Yerevan, Armenia  
(37491)94-54-02; e-mail: mmelkumi@yahoo.com*

## Key words

dynamic oscillation damper; seismic actions; harmonic oscillations; building model; vibration tests; damper tuning; damper effectiveness

## Abstract

The given work to some extent meets the shortage of experimental investigations directed to the study of the behavior of buildings with dynamic oscillation dampers. Investigations were carried out by means of vibration testing on a large-scale model of a 9-story frame building. The purpose was revealing the effectiveness and damping properties of two-mass damper and comparing them with the effectiveness of single-mass damper. Before construction of such a damper in a form of an additional tenth floor, the dynamic characteristics of the model (periods and damping factors) were determined and their values are given in the paper.

It was revealed that the maximum amplitude of oscillations on the top level of model (the slab of the 9<sup>th</sup> floor) with the main damper is almost 3 times less than the amplitude of oscillations on the top level of the model without damper. The amplitude of oscillations of the main damper was about 3-4 times bigger than the amplitude of oscillations on the top level of model. A damping factor of the main damper determined by the record of free oscillations was equal to  $\xi=0.7\%$ .

Then the damper was transformed from the single-mass to the two-mass damper by suspending the second mass to the slab of the main damper. The obtained results show the high effectiveness of the two-mass damper as its damping degree reaches to about 4.4, that is 46.7% bigger than that of one-mass damper. If before suspending the second mass to the single-mass damper its maximal amplitude was about 3.5cm, then after it the amplitude became equal to 1.4cm. The experimental investigations confirm the quite high effectiveness of the dynamic oscillation dampers and incontrovertible expediency of their application for increasing of earthquake resistance of buildings and structures.

## References

1. Nawrotzki P. Strategies for the Seismic Protection of Structures. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*. Yerevan, Armenia, 2003. Pp. 48-58.
2. Palazzo B., Petti L., De Luliis M. A Passive Robust Control Strategy: Base Isolation and Tuned Mass Damping. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Structural Control*. Vienna, Austria, 2004. Pp. 51-210.
3. Taniguchi T., Der Kiureghian A., Melkumyan M. Effect of Tuned Mass Damper on Displacement Demand of Base-Isolated Structures. *Engineering Structures*. 2008. No. 12, Vol. 30. Pp. 3478-3488.
4. Fujitani H., Saito T. Devices for Seismic Isolation and Response Control. *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. Taylor & Francis, 2006. Pp. 193-248.
5. Melkumyan M. G. Dynamic Tests of the 9-story R/C Full-scale Building with an Additional Isolated Upper Floor Acting as Vibration Damper. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Structural Dynamics: EURO DYN'96*, Florence, Italy, 1996. Vol. 1. Pp. 557-560.
6. Melkumyan M. G. Tragediya Spitaka ne dolzhna povtoritsya [The tragedy of Spitak has not to repeat]. Yerevan, 1998. Pp. 193-205. (rus)
7. Melkumyan M. G. Base and Roof Isolation for Earthquake Retrofitting and Protection of Existing Buildings in Armenia. *Proceedings of the International Symposium on Seismic Risk Reduction (the JICA Cooperation Project in Romania)*. Bucharest, Romania, 2007. Pp. 593-600.
8. Melkumyan M. G. *New Solutions in Seismic Isolation*. Yerevan: LUSABATS, 2011. 264 p.

Melkumyan M.G. Investigation of the effectiveness of single-mass and two-mass dynamic oscillation dampers on the model of frame building under the vibration testing



9. Melkumyan M. G. *Formirovaniye dinamicheskikh raschetnykh modeley pri analize seysmicheskoy reaktivnoy zhelezobetonnykh zdaniy i ikh novyye konstruktivnyye resheniya* [The dynamic calculation models formation under the analysis of reinforced concrete buildings seismic reaction and their new construction solutions]. Yerevan, 1993. 100 p. (rus)
10. Nazarov A.G. Назаров А. Г. *O mekhanicheskom podobii tverdykh deformiruyemykh tel* [On the mechanical similarity of solid deformable bodies]. Yerevan, 1965. 218 p. (rus)
11. Minassian A. Ts., Melkumyan M. G., Khachian E. E. Testing of 9-storey Frame-panel Building (series 111) Having a Seismic Protection System in the Form of an Additional Flexible Upper Floor Acting as Vibration Damper. *Abstracts of the International Conference "Continental Collision Zone Earthquakes and Seismic Hazard Reduction*. Yerevan-Sevan, Armenia, 1993. Pp. 60-61.
12. Korenev B.G., Reznikov L.M. *Dinamicheskiy raschet sooruzheniy na spetsialnyye vozdeystviya. Spravochnik proyektirovshchika* [Dynamic calculation of buildings on special actions. Designer handbook]. Moscow, 1981. Pp. 149-175. (rus)
13. Yoshizumi F., Sano K-i., Inoue H. Optimum Robust Design for Multi-TMD Systems Composed of a Few Dampers. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Structural Control*. Como, Italy, 2003. Vol. 3. Pp. 735-740.
14. Warburton G. Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1982. No. 10. Pp. 381-401.
15. Makino A., Imamiya J., Sahashi N. High-rise Building Seismic Vibration Control Using Large Tuned Top-floor Mass Damper. *Proceedings of the JSSI 15<sup>th</sup> Anniversary International Symposium on Seismic Response Controlled Buildings for Sustainable Society*. Tokyo, Japan, 2009. Paper RC-15. Pp. 42-51.
16. Shooshtari A., Afzali H. Effects of TMD System on 15-story R/C Frame Response under Ground Excitation. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*. Ohrid, Republic of Macedonia, 2010. Paper No. 797.
17. Chang K-Ch., Hwang J-Sh., Wang Sh-J. Applications of Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems to Buildings in Taiwan. *Proceedings of the JSSI 15<sup>th</sup> Anniversary International Symposium on Seismic Response Controlled Buildings for Sustainable Society*. Tokyo, Japan, 2009. Paper OS-7. Pp. 42-51.
18. Dorka U. E. Towards a Safety Concept for Buildings with Structural Control. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Structural Control*. Paris, France, 2000. Pp. 127-140.

**Full text of this article in Russian: pp. 23-29**