



С. Б. МАКАРОВ

кандидат технических наук, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Н. В. ПАНКОВА

кандидат физико-математических наук Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

С. Н. ТРОПКИН

кандидат технических наук, ООО «Тесис», Москва, Россия

УДК 624.042.7

КАК РАБОТАЮТ АМОРТИЗАТОРЫ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ? ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА ЧИСЛЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ. ЧАСТЬ 2.

Представлено компьютерное исследование по сейсмозащите. В части 1 было показано, что пассивные резиноподобные амортизаторы в фундаментах зданий зачастую недостаточно эффективны. Цель данной работы: на модельной задаче посмотреть возможность применения нетрадиционного для задач сейсмозащиты подхода – изменить резонансные свойства защищаемого объекта путем применения пассивного многочастотного динамического гасителя колебаний. Действительно, при отсутствии априори конкретной информации о возможном землетрясении под конкретным зданием – о направлении его воздействия, о его частотных составляющих, способных совпасть с резонансными частотами защищаемого здания и т.п., как осуществить защиту объекта? Компьютерное моделирование показало, что если рассмотренный в части 1 амортизатор использовать как пассивный многочастотный динамический гаситель, установив его на крыше здания, то можно получить заметный эффект снижения резонансных пиков.

Ключевые слова: амортизаторы, многочастотный динамический гаситель (МДГК), упругие системы, резонанс, формы колебаний, землетрясения, техногенные катастрофы.

В работах авторов [1-2], показано, что ввиду наличия у кирпичных и бетонных зданий основных собственных резонансов в частотном диапазоне сейсмических воздействий (до 15-20 Гц), эффективно применять пассивные многочастотные динамические гасители колебаний. В части 1 данной работы, представленной в журнал «СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО. БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ», показано, что использование пассивных резиноподобных амортизаторов на фундаменте не решает вопроса об эффективном снижении колебаний этих зданий при низкочастотных (до 15-20 Гц) воздействиях. Однако проблема защиты существующих зданий стоит сейчас особенно остро с увеличением сейсмической активности в различных регионах планеты.

При исследовании модельных задач, представленном в части 1 нашей работы, был получен неутешительный прогноз применения пассивных резиноподобных амортизаторов, т.е. не удалось снизить влияние сейсмического воздействия на пути его распространения, а пик ускорений в точке наблюдений на крыше модельного «здания» просто сместился ниже по частоте. Поэтому остается использовать последний из трех классических путей снижения уровня колебаний защищаемого объекта – изменить его резонансные свойства.

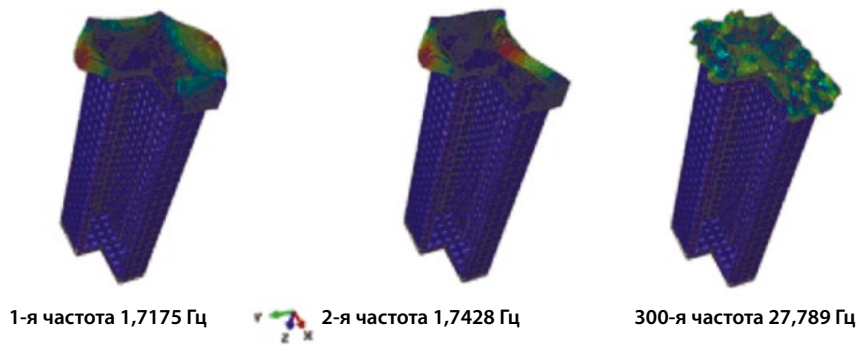


Рисунок 1 — Формы колебаний здания с гасителем

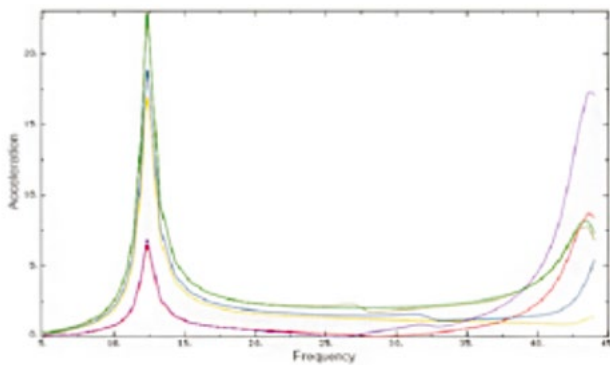


Рисунок 2 — АЧХ виброускорений здания без гасителя по оси X

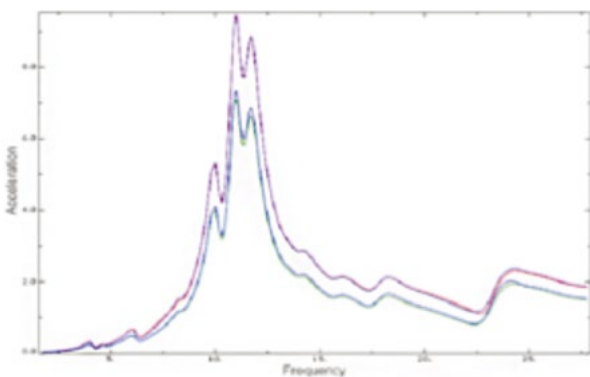


Рисунок 3 — АЧХ виброускорений здания с гасителем по оси X

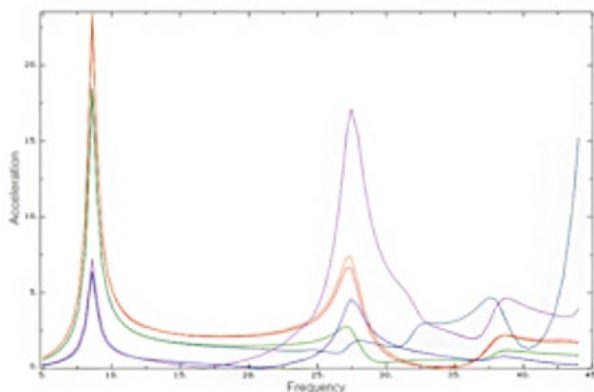


Рисунок 4 — АЧХ виброускорений здания без гасителя по оси Y

В модельной задаче, исследованной на комплексе ABAQUS STUDENT EDITION, для изменения (корректировки) резонансных свойств защищаемого объекта было решено установить на нем многочастотный динамический гаситель, т.е. упругий объект с большим количеством собственных частот и форм колебаний в предполагаемом частотном диапазоне вредного низкочастотного воздействия. Для наглядности – поставить амортизатор, описанный в первой части исследования, на крышу здания, а не закапывать его вместе с фундаментом здания в землю. Причем установить его углублением для **фундамента здания вверх**, при этом жестко связав его дно с крышей.

Что это даст? Поскольку геометрия и материал «бывшего амортизатора» не изменились, но деформация его боковых стенок теперь ничем не ограничена, спектр его собственных частот и форм колебаний существенно изменится за счет появления значительного количества собственных форм колебаний с деформациями боковых стенок «бывшего амортизатора» (с различным количеством полуволн). Теперь это будет не амортизатор, а многочастотный гаситель колебаний.

Был выполнен расчет 50 собственных частот здания без гасителя и 300 частот здания с гасителем.

Расчеты **здания без гасителя** показали наличие 3 собственных частот в «сейсмическом» диапазоне: 2 собственные частоты 8.5802 Гц и 12.234 Гц с «балочными» собственными формами и 1 собственная частота (24.132 Гц) с собственной формой «оболочечного» типа.

На рис. 1 приведены формы колебаний **здания с гасителем** на двух первых частотах (1.7175 Гц, 1.7428 Гц) и последняя в расчетах на собственные значения частот – 300-я частота 27.789 Гц. В диапазоне до 300-й частоты наблюдаются значительные колебания резинового гасителя, а здание деформируется очень незначительно, что видно на рис. 1, сделанном с вырезом, позволяющим видеть деформирование противоположных стенок гасителя. Это указывает на эффективную работу гасителя колебаний – энергия колебаний здания перекачалась в энергию колебаний гасителя.

Количественная оценка результатов применения гасителя проводилась по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) виброускорений точек наблюдения, в качестве которых выбирались узлы расчетной КЭ модели, расположенные на «крыше здания» вблизи угла, по широкой и узкой сторонам здания в верхней его части и точках посередине боковых стен.

АЧХ точек наблюдения защищаемого объекта были определены при кинематическом возбуждении его основания ускорением с единичными амплитудами по всем 3 осям координат во всем частотном диапазоне, рассмотренном при компьютерном моделировании – *так называемым усеченным белым шумом* [3]. Это базируется на том, что в модальном анализе существует одно из трех предположений линейности – **наложение**. Частотные характеристики не зависят от типа и формы волны возбуждения. Возбуждение синусоидальной силой с разверткой частоты дает те же результаты, что и возбуждение широкополосной случайной силой.

По оси частот в расчетах диапазон частот задавался: 1 (первая частота исследуемого интервала) до 300-й (последняя рассчитанная частота) с коэффициентом модального демпфирования 0.03.

Как было отмечено выше, целью описываемого в настоящей статье исследования (ч.1 и ч.2) было сравнить на примере пространственного модельного объекта эффект от применения упруго-инерционного резиноподобного тела в качестве пассивного амортизатора (см. ч.1) и в качестве пассивного многочастотного динамического гасителя колебаний (ч.2).

Поэтому решение описываемых модельных задач проводилось на основе модального подхода, с использованием действительных мод, т.к. в объекте отсутствовали сосредоточенные демпферы, наличие которых потребовало бы решения с использованием комплексных мод (хотя технически такая возможность существовала, она не была использована, чтобы не усложнять изложение). Результаты представлены в виде АЧХ виброускорений точек наблюдения на здании по осям координат. Аналогично части 1 этой статьи на эту тему – ось X направлена вдоль широкой части здания, ось Y – вдоль узкой части здания, ось Z направлена вертикально вверх.

На рис.2 приведены АЧХ виброускорений здания без гасителя по оси X. Основной вклад в резонансный пик с амплитудой 25 в окрестности 12 Гц вносит 2-я собственная частота здания без гасителя («балочная» форма).

Из сравнения рис.3, где приведены АЧХ виброускорений здания с гасителем по оси X, с рис. 2, где приведены аналогичные АЧХ для здания без гасителя, видно, что амплитуда резонансного пика в районе 12 Гц после установки гасителя снизилась с 25 до 7.5, что указывает на эффективность применения гасителя. На рисунке частотная ось начинается с частоты 5 Гц, т.к. у здания нет более низких частот. На рис.3 частотная ось начинается с 1 Гц, т.к. у здания с гасителем есть более низкие частоты колебаний.

На рис.4 приведены АЧХ виброускорений здания без гасителя по оси Y. В районе 8 Гц четко проявляется резонанс на 1-й частоте 8.5802 Гц – «балочная» форма – колебание широкой части здания относительно оси X. Остальные резонансы вне зоны сейсмоки.

На рис.5 приведены АЧХ виброускорений здания с гасителем по оси Y. Максимальные амплитуды по виброускорениям снизились почти в 1.6 раза. И других резонансов в зоне сейсмоки практически нет.

На рис.6 приведены АЧХ виброускорений здания без гасителя. В зоне сейсмоки резонансные пики невелики, эти

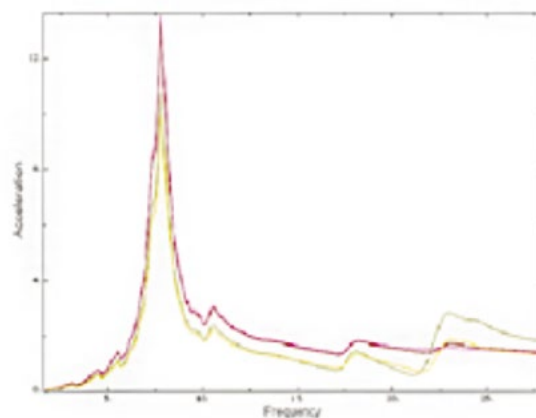


Рисунок 5 — АЧХ виброускорений здания с гасителем по оси Y

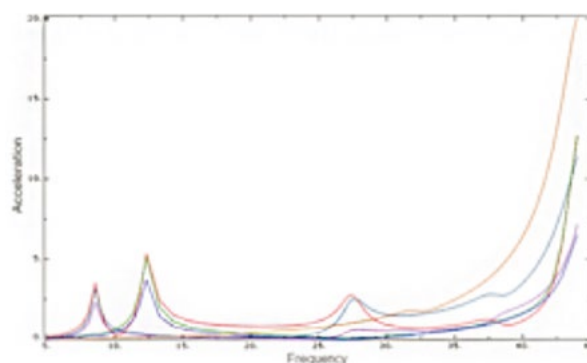


Рисунок 6 — АЧХ виброускорений здания без гасителя по оси Z

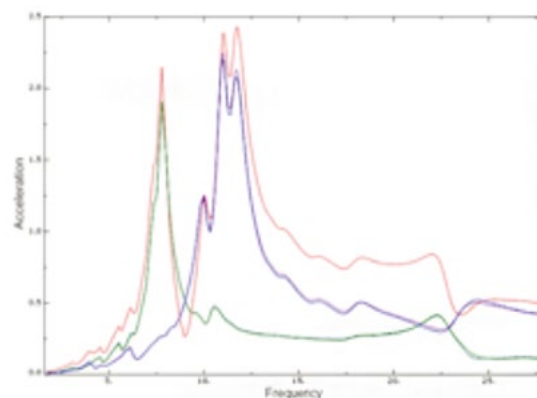


Рисунок 7 — АЧХ виброускорений здания с гасителем по оси Z

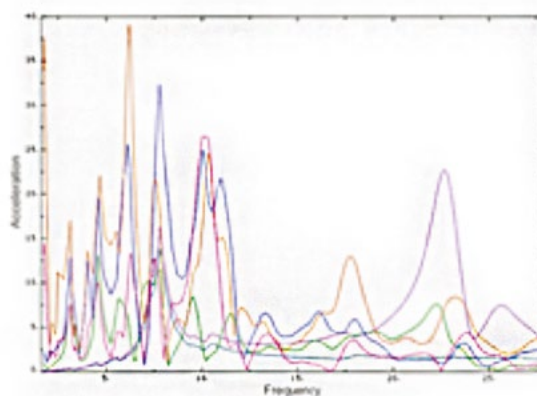


Рисунок 8 — АЧХ виброускорений точек наблюдения гасителя по оси Y

формы колебаний «балочные», соответствуют колебаниям широкой и узкой части здания относительно осей X и Y соответственно, но даже эти резонансные пики у здания с установленным гасителем снизились более чем в 2 раза (рис.7).

За счет чего снизились резонансные пики у здания с гасителем?

Вследствие установки многочастотного динамического гасителя в зоне максимальных амплитуд низкочастотных колебаний здания удалось энергию колебаний здания перекачать в колебания гасителя. На рис.8 показаны АЧХ виброускорений различных точек наблюдения многочастотного гасителя колебаний («бывшего амортизатора») по оси Y в интервале частот (0-25Гц). Видны большие амплитуды виброускорений точек гасителя. Наша задача была показать эффект гашения колебаний здания через перекачку энергии колебаний здания в колебание многочастотного гасителя. На рис.1 видно, что в диапазоне сейсмике наблюдаются интенсивные колебания вертикальных стенок гасителя. Сначала при малых собственных частотах эти колебания более значительные по амплитуде, с увеличением частоты вертикальные стенки гасителя колеблются с меньшей амплитудой, но при этом есть деформации горизонтальной части дна гасителя. Этим объясняется разная форма резонансных кривых.

Аналогичная картина и по другим осям.

Компьютерное моделирование в пространственной постановке позволило сравнить, как именно работал резиноподобный амортизатор в фундаменте здания и на его крыше при низкочастотном (сейсмическом) воздействии. Авторы не утверждают, что приведенная в статье форма гасителя совершенна для такой задачи. Мы считаем, что с помощью вычислительного комплекса можно добиться более существенных результатов гашения резонансных колебаний зданий, изменяя форму гасителя (изменяя его упругие свойства), материалы (из которых он изготовлен) и места установки (но устанавливать гаситель надо там, где больше всего проявляются резонансные явления самого здания).

И последнее. Мы ни в коем случае не отрицаем науку сейсмике, мы отвечаем твердо, что это не так. Просто мы предложили подойти к задаче сейсмозащиты с другой стороны – использовать многочастотный динамический гаситель, который обладает большим количеством резонансных частот в диапазоне действия сейсмике. При подсоединении гасителя к защищаемому объекту произойдет некоторое изменение частотного набора системы в целом, т.к. система стала другой. И если в сейсмическом воздействии «найдутся» резонансные частоты, то произойдет гашение колебаний защищаемого объекта при интенсивных колебаниях гасителя. Именно это мы и описали.

В нашем институте существовал (довольно давно) эксперимент с балочными моделями, который вызывал

удивление. Металлическая полоса из титана в центральной своей части была горизонтально жестко соединена с вибратором. Другая, более короткая полоса из алюминия была за край жестко прикреплена к одному из концов титановой полосы вертикально. При этом, конечно, был произведен предварительный расчет алюминиевой полосы так, чтобы у полос из разных материалов были близкие частоты. Собирались получить многочастотный динамический гаситель из алюминиевой полосы. Когда включили вибратор, то зрители увидели необычную картину: свободный конец титановой балки совершал интенсивные колебания, другой же конец титановой балки, на которой закреплена алюминиевая полоса был неподвижен относительно поверхности вибратора. Однако на нем интенсивно колебалась алюминиевая полоса. И это происходило на разных частотах.

ВЫВОДЫ.

Проведено компьютерное моделирование задачи по применению амортизаторов в фундаменте здания, которое следует защитить от сейсмического воздействия. В части 2 предложенного исследования амортизатор был помещен не на фундамент здания, а на крышу, где проявляются наиболее значимые колебания здания во время землетрясений в диапазоне до 20 Гц. При этом амортизатор проявил себя как пассивный многочастотный динамический гаситель колебаний (МДГК). Показана его эффективная работа по перекачке энергии колебаний здания при землетрясениях в колебания его самого. Следовательно, МДГК в виде упруго-инерционного континуума, установленного в наиболее виброактивной части защищаемого от землетрясения здания, предотвращает разрушение здания за счет подавления резонансных режимов.

В данном исследовании (части 1 и 2) авторы на примере компьютерного эксперимента на модельной задаче увидели, что один и тот же упруго-инерционный объект, использованный по-разному, приведет к разным результатам. Как амортизатор он «смягчит», т.е. уменьшит жесткость закрепления объекта, и сдвинет спектр собственных форм упругих колебаний объекта в сторону низших частот, а в качестве многочастотного динамического гасителя он изменит собственные формы объекта, обеспечив снижение уровня вибрации в заданном месте объекта.

Авторы полагают, что сочетание двух подходов: первого – снижение вибрации на пути ее распространения с помощью амортизаторов и второго – путем целенаправленной корректировки резонансных свойств защищаемого объекта с помощью пассивных многочастотных динамических гасителей, может открыть новые возможности виброзащиты различных объектов.

Литература

1. Макаров С.Б., Панкова Н.В., Тропкин С.Н. Использование пассивных многочастотных гасителей колебаний (МДГК) в задачах сейсмозащиты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 6. С.42-47.
2. Макаров С.Б., Панкова Н.В., Перминов М.Д.,

- Тропкин С.Н. Модельная задача о гашении колебаний зданий с помощью многочастотных динамических гасителей (МДГК) при природных и техногенных катастрофах // Машиностроение и автоматизация. 2016. № 4. С.117-121.
3. Макаров С.Б., Панкова Н.В., Тропкин С.Н. Как работают амортизаторы в задачах

- сейсмозащиты зданий? Исследование на SIMULIA ABAQUS. Часть 1 // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С.39-42.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Перевод с английского. Изд. Мир, 1989. С.136-137.

Материалы хранятся по адресу: 101990, г. Москва, М. Харитоньевский пер., д.4, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, тел.: 8 (499) 135-60-78, e-mail: sb-makarov@yandex.ru

MAKAROV S., PhD, research fellow, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS
PANKOVA N., PhD, leading research scientist, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS
TROPKIN S., PhD, expert, Tesis Ltd

HOW DO THE SHOCK ABSORBERS WORK FOR THE SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS? INVESTIGATION OF THE QUESTION BY NUMERIC SIMULATIONS. PART 2.

Abstract

A computer study on seismic protection is presented. Part 1 has shown that passive rubber-like shock absorbers in the foundations of buildings are often not effective enough. The purpose of this work is to look at the possibility of applying an unconventional approach for seismic protection tasks. A model task is used to change the resonant properties of the protected object by applying a passive multifrequency dynamic vibration absorber. Indeed, in the absence of specific information on a possible earthquake under a particular building – on the direction

of its impact, on its frequency components, which can coincide with the resonant frequencies of the protected building, etc., how to protect the object? Computer simulation showed that if the damper considered in Part 1 is used as a passive multifrequency dynamic absorber, placed on the roof of the building, then it is possible to obtain a noticeable effect of reduced resonant peaks.

Keywords: shock absorbers, multifrequency dynamic absorber (MDGK), elastic systems, resonance, vibration modes, earthquakes, technogenic catastrophes.

References

1. Makarov S.B., Pankova N.V., Tropkin S.N. Ispolzovanie passivnykh mnogochastotnykh gasitelei kolebaniy (MDGK) v zadachah seizmozashchity //Seismostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii. 2016. № 6. S. 42-47.
2. Makarov S.B., Pankova N.V., Tropkin S.N. Modelnaya zadacha o gashenii kolebaniy zdaniy s pomoshchiu mnogochastotnykh dinamicheskikh gasitelei (MDGK) pri prirodnykh i tehnogennykh katastrofah //Mashinostroenie i avtomatizatsiya. 2016. № 4. S. 117-121.
3. Makarov S.B., Pankova N.V., Tropkin S.N. Kak rabotaiut amortizatory v zadachah seizmozashchity zdaniy? Issledovanie na SIMULIA ABAQUS. Chast' I // Seismostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii. 2017. № 4. S. 39-42.
4. Bendat J., Pirsol A. Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh. Perevod s angliiskogo. Izd. Mir, 1989. S. 136-137.

Для цитирования: Макаров С.Б., Панкова Н.В., Тропкин С.Н. Как работают амортизаторы в задачах сейсмозащиты зданий? Исследование вопроса численным моделированием. Часть 2 // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 1. С. 46-50.

For citation: Makarov S.B., Pankova N.V., Tropkin S.N. How do the shock absorbers work for the seismic protection of buildings? Investigation of the question by numeric simulations. Part 2 // Earthquake engineering. Constructions safety. 2018. № 1. С. 46-50.



Qingdao, China, July 22-25, 2018

Second Announcement and Call for Papers 7WCSCM

The 7th World Conference on Structural
Control and Monitoring

<http://smc.hit.edu.cn/wcscm2018>