

## **Система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне**

**С.А.Чипко, О.А. Бурцева**

**Введение.** Актуальность проблемы сейсмозащиты зданий и сооружений объясняется постоянным наличием сейсмической активности в различных районах Земли. Только за последнее десятилетие в мире было зарегистрировано более 4 тыс. стихийных бедствий. Например, 26.01.2001 года мощное землетрясение магнитудой 7,9 баллов произошло на северо-западе Индии. Погибло около 20 тыс. человек, более миллиона жителей остались без крова. 29.12.2003 года два подземных толчка магнитудой 6,3 и 5,3 балла разрушили города Бам и Баравай на юге Ирана. Погибло не менее 40 тыс. человек. 8.10.2005 года в Пакистане произошло самое сильное землетрясение на Азиатском континенте за последние 100 лет. Разрушения достигли невиданных масштабов, поразив территорию Пакистана, Афганистана и Индии. Погибло 79 тыс. человек, пострадавших – более 200 тыс человек. 12.05.2008 года землетрясение в китайской провинции Сычуань признано самым мощным за последние 30 лет. Пострадавших насчитано более 400 тыс. человек, погибших – 70 тыс.

Одной из страшнейших мировых катастроф стало землетрясение на Гаити в 2010 году. Оно унесло 223 тыс. жизней и 1,2 млн. человек остались без крова над головой.

Март 2011 года, Япония. Разрушительное землетрясение и последовавшее за ними цунами унесли жизни более 19 тыс. человек. Свыше 340 тыс. эвакуированы из опасных районов и живут во временных пристанищах. Из-за удара стихии произошла катастрофа на АЭС «Фукусима-1». В результате район вокруг станции радиусом 20 км. объявлен зоной отчуждения.

До настоящего времени для решения проблемы виброзащиты приме-

нялись системы пассивного подавления колебаний, которые можно классифицировать по принципу действия: демпфирующие, адаптивные, инерционные (с гасителями колебаний), регулирующие жесткость конструкции, изолирующие. К наиболее эффективным и менее затратным можно отнести последние три группы [1-3].

Система активной виброзащиты используются с целью подавления остаточных нежелательных колебаний сооружения после отработки пассивной системы. Поэтому говорить о создании активной системы компенсации возможно лишь после исследования эффективности пассивной.

Инерционные системы предполагают наличие различных гасителей колебаний или гироскопических устройств. Это требует выделения большого помещения (масса гасителя примерно равна 1-2% от массы сооружения) в верхних частях высотных сооружений для монтажа, обслуживания и настройки гасителя, что затруднительно на высоте 300-500 метров. Конструкция гасителя должна быть максимально простой, а его работа не должна зависеть от влияния атмосферных явлений. Гаситель обычно настраивают на частоту основного тона колебаний конструкции, чтобы исключить явления резонанса.

Регулирование жесткости в сооружении осуществляется установкой оттяжек, дополнительных связей или панелей. Устройства эффективно подавляют колебания на различных частотах, существенно повышая жесткость конструкции и как бы «уводя» ее из резонансного спектра частот. Регулирование жесткости необходимо осуществлять по всей высоте сооружения.

Изолирующие системы самые древние и широко используемые. Сюда относят сейсмоизолирующие пояса, устройство гибкой нижней части конструкции, скользящие и кинематические опоры.

Системы со скользящими опорами призваны существенно снижать горизонтальные нагрузки, передаваемые на несущие надземные конструк-

ции здания, вследствие возможности их проскальзывания относительно фундамента. Часть энергии, сообщаемая сооружению, затрачивается при этом не на преодоление сопротивления связей в конструкции, а на преодоление сил трения скольжения. В качестве материалов здесь используют неопрен, тефлон, трехслойный наирит (резиновая сборка, армированная алюминиевыми пластинами), фторопласт и другие пластики, элементы с сухим трением, а также вязкие жидкости.

Несколько заданий со скользящим поясом построено в г. Фрунзе. Проведенные натурные испытания подтвердили работоспособность данных систем.

Похожая система была применена при строительстве атомной электростанции «Koeberg» и Армянской АЭС.

Опыт строительства показал, что СПГК со скользящими опорами могут быть успешно применены для сооружений с жесткой конструктивной схемой. Среди достоинств данных систем следует отметить простоту и легкость выполнения в заводских условиях, либо на строительной площадке.

Впервые системы с кинематическими опорами были предложены М. Вискордини в 1925 году и предусматривали устройство в подземной части зданий катковых опор или колонн со сферическими верхними и нижними опорами. Позднее были предложены еще несколько вариантов использования опор качения с системами изоляции [4-7].

Назин В.В. – автор систем изоляции с кинематическими опорами, выполненными в виде эллипсоидов вращения. Под его руководством были спроектированы и построены в Севастополе пятиэтажное здание с 6,5 тыс. ароцементных эллипсоидов вращения высотой 6 см., а также восьмиэтажное здание с 270 железобетонными стойками высотой 41 см. со сферическими поверхностями торцов. В обоих сооружениях дополнительно были применены демпферы сухого трения.

Применение систем с кинематическими опорами еще недостаточно изучено, особенно при горизонтальном воздействии с доминантным периодом более 1 с. В этом случае здание с кинематическими опорами получает значительные смещения, при котором происходит потеря устойчивости всего сооружения и его полное обрушение.

Исследование динамического поведения механических систем, стесненных кинематическими связями, проведено в работах [8-10]. Авторы рассматривают движение несомых тел по неподвижным поверхностям. Однако ими не изучается влияние движения на динамику несущих тел. Широкий спектр работ теоретического и прикладного характера посвящен изучению динамического поведения механических систем связанных твердых тел с качением шаров, цилиндров, роликов по подвижным поверхностям несущих тел [11-13].

С целью формирования эффективной системы виброзащиты сформируем требования к системам пассивной компенсации колебаний высотных сооружений.

1. Высотные здания и сооружения подверженные сейсмическому воздействию, обладают большой инерционностью. Поэтому для компенсации колебаний требуется создание огромных управляющих усилий.

2. Система компенсации должна находиться в постоянной готовности и быть готовой для принятия очередного толчка землетрясения.

3. Исполнительные механизмы системы компенсации должны органически вписываться в несущие конструкции сооружения, улучшать его амплитудно-частотные характеристики, не нарушать эстетику сооружения.

4. Работа системы компенсации в активном режиме не должна нарушать комфортности в сооружении (бесшумность работы, исключение режимов, нарушающих санитарно-гигиенические нормы, не допускать ускорений при компенсации).

5. Энергетические, эксплуатационные, капитальные затраты должны

быть минимальными.

6. Система компенсации должна быть надежной и доступной в обслуживании техническим персоналом.

На основе выше перечисленных требований, проведенного анализа устройств и систем виброкомпенсации, предлагаем систему компенсации колебаний высотного сооружения, приведенную на рис. 1.

Сооружение установлено на сваях-стойках, каждая из которых выполнена в виде «стакана». Нижняя часть сваи оснащена вогнутыми полусферическими выемками радиуса  $R$  (см. рис. 1, б). Количество выемок должно быть симметричным по обоим координатам с целью сохранения устойчивости сваи. Масса сваи и воспринимаемая ею нагрузка является массой несущего тела. Свая опирается на сферические однородные шарниры с массой ролика  $m_2$  и радиуса  $r$ . Несомое тело (стакан сваи), массой  $m_3$  находится под действием внешнего кинематического возбуждения.

Поскольку стакан сваи находится в грунтовом слое, то жесткостные и диссипативные характеристики грунта описываем параметрами  $C_{x3}(C_{y3})$  и  $\mu_{x3}(\mu_{y3})$  соответственно.

Между сваем и стаканом дополнительно установлены демпферы с диссипацией  $k_{x3}(k_{y3})$ . Количество демпферов может быть любым, но не менее двух с каждой стороны сваи.

Предложенная система компенсации колебаний реализует принцип сейсмоизоляции сооружения от фундамента. Причем под действием собственного веса сооружения она способна вернуться в исходное положение после сейсмолотчка. Кроме того, предусмотрено проскальзывание сваи относительно фундамента в двух направлениях. Ограничение относительно смещения осуществляется посредством полусферических выемок.

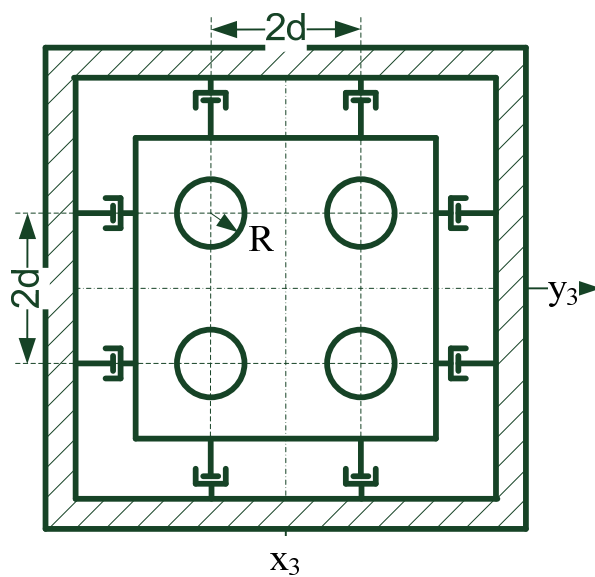
Данная система хорошо вписывается в конструкцию свайного фундамента, не требует дополнительного пространства, бесшумна, не допус-

кает ускорений. В полусферических выемках со временем не накапливается влага, лед, пыль, поскольку они выполнены выпуклостью вверх. Этот фактор является существенным, поскольку система устанавливается в труднодоступном месте сооружения.

Ролики системы компенсации изготавливают из чугуна, стали или асцемента, что позволяет говорить о ее надежности.

Вместо сферических шарниров можно использовать шаровые тела качения, не закрепленные на стакане сваи.

Итак, трехмассовая механическая система абсолютно твердых тел: несущее (рабочее) тело с массой  $m_1$ , ролик массой  $m_2$  и несомое тело массой  $m_3$  образуют динамическую систему, подверженную внешнему кинематическому возбуждению. Движение несомого тела отражает динамическое поведение фундамента. Движение несущего тела представляет собой динамику верхнего строения сооружения, которое через систему шаровых тел качения опирается на фундамент. Оно моделирует сооружение или строительную конструкцию, колебания которого будем учитывать только по первой форме с частотой основного тона. Это объясняется тем, что вынужденные колебания сооружения по первой форме вносят основной вклад в их динамическое напряженно-деформированное состояние.



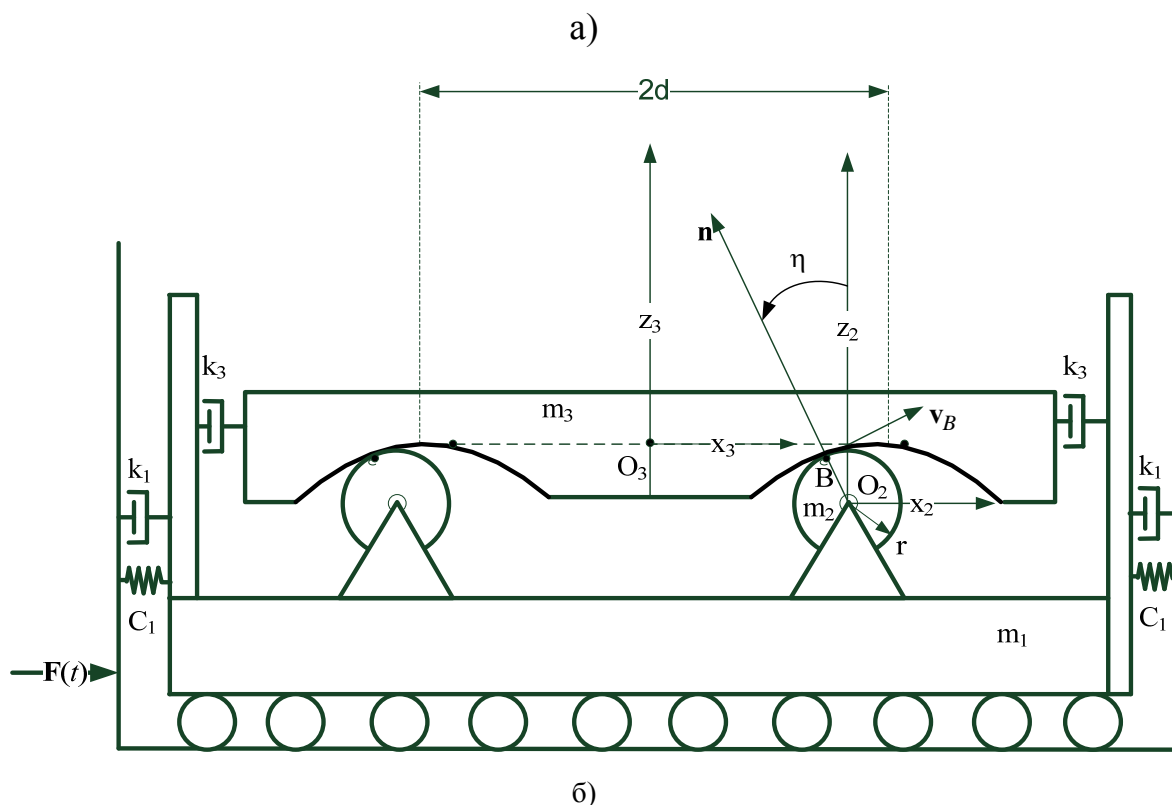


Рис. 1. - Принципиальная схема сейсмозащитной системы: а) вид сверху; б) вид сбоку

С практической точки зрения масса свай с шаровыми опорами должна составлять 1-2% от массы всего сооружения.

Важным свойством роликового виброгасителя является его изохронность, т.е. независимость частоты вынужденных колебаний верхней части сооружения от амплитуды отклонения шаров на опорах. Это обстоятельство особенно важно в ситуации неопределенности максимальной амплитуды внешнего кинематического воздействия.

Основным звеном роликового гасителя является сферический шарнир, шаровое тело, которого вращаясь, перекачивается по выемке несущего тела без скольжения. Перекачивание без скольжения является необходимым условием ввиду технического требования точного возврата (без накопления относительных перемещений масс  $m_2$  и  $m_3$ ) в первоначальное, до сейсмозвуждения, положение. Практическая реализация этого требо-

вания не представляет затруднений, так как при использовании стальных, чугунных и т.п. элементов сейсмоамортизатора, оно всегда выполняется.

Главное преимущество предложенного гасителя (см. рис. 3) перед роликовым гасителем с полусферическими рабочими выемками [4], (см. рис. 2) состоит в том, что центр масс его рабочего тела всегда движется по циклоиде и частота собственных колебаний такого гасителя не зависит от относительных перемещений несущего (рабочего) тела.

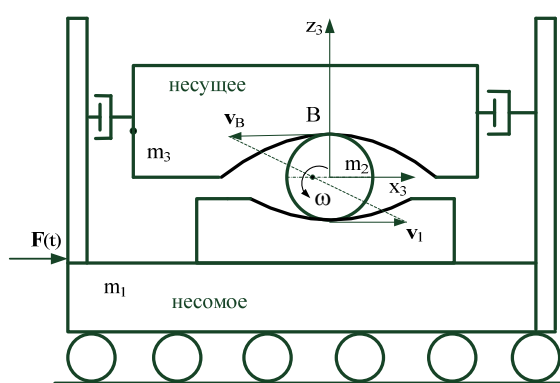


Рис. 2. – Роликовый гаситель колебаний с полусферическими выемками

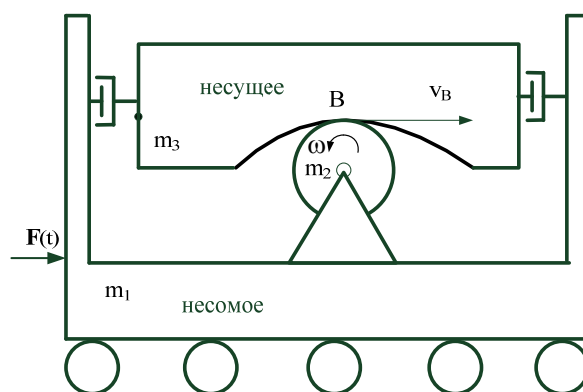


Рис. 3. – Кинематический (катковый) гаситель колебаний

Между несущим и несомым телами установлены демпферы с коэффициентами демпфирования  $k_3$ . Несущее тело может двигаться вдоль осей  $O_2X_2$  и  $O_2Y_2$ . Компенсация движения несущего тела осуществляется упругим элементом с коэффициентом жесткости  $C_1$  и демфером с коэффициентом демпфирования  $k_1$ . Рабочее тело гасителя может совершать поступательные движения в плоскости  $X_3Z_3$  (рис. 1, б).

Внешнее кинематическое возбуждение  $X_0(t)$  (упругая волна в земной коре), которое воздействует на несущее тело, задано в виде экспоненциально затухающей синусоиды [12]:

$$X_0(t) = Q_0 e^{-\xi t} \sin(\omega_B t),$$

где  $Q_0$  – максимальная (начальная) амплитуда внешнего кинематического возбуждения;  $\xi$  – коэффициент затухания интенсивности внешнего возбуждения;  $\omega_B$  – круговая частота внешнего возбуждения.



После прохождения кинематического воздействия возникают колебания сейсмозащитной системы, при этом сопротивление грунта в окрестности фундамента описывается моделью в виде упругого элемента с жесткостью  $k_1$  и вязкого демпфера с коэффициентом вязкого сопротивления  $C_1$  [13].

Основные преимущества предложенного сейсмоамортизатора (по сравнению с существующими [1–7]) состоят в том, что он всегда возвращается в исходное до сейсмозабуждения положение. При этом сейсмоамортизатор всегда готов к надлежащему восприятию следующего горизонтального толчка любой амплитуды  $Q_0$ .

Предложенная система виброкомпенсации компактна не требует отдельного помещения для эксплуатации.

Применение катковых гасителей целесообразно при частотах основного тона собственных колебаний сооружения, меньших 1,8 рад/с, и в условиях дефицита рабочего пространства. Поглощение энергии сейсмодолны в гасителе осуществляется с помощью двух воздушных демпферов, которые работают во взаимно-перпендикулярных направлениях.

### Литература:

1. Кузина, О.А. Анализ устройств и систем гашения колебаний высотных сооружений башенного типа /Юж. – Рос. гос. техн. ун-т. - Новочеркасск, 2002. – 65 с. Деп. в ВИНТИ 23.05.02. - Аннот. в БУ ВИНТИ «Деп. науч. работы», 2002. - №7. – Б.о. № 60.
2. Смирнов, И.И., Захарова, К.В., Авилкин, В.И., Стрельников, Г.П. [К использованию торсионных энергопоглотителей для сейсмозащиты сооружений](#) [Электронный ресурс] // «Инженерный Вестник Дона», 2012. - № №4(Ч.2). – Режим доступа [http: // http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1314](http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1314) (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. Смирнов, И.И., Захарова, К.В. [К расчету упругопластических торсионных энергопоглощающих устройств](#) [Электронный ресурс] // «Инженерный

Вестник Дона», 2012. - № №4(Ч.2). Режим доступа <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1312> (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.

4. Сейсмоизоляция и адаптивные системы сейсмозащиты. - М.: Наука, 1983. - 324 с.

5. Сейсмостойкие здания и развитие теории сейсмостойкости (По материалам 6 Международной конференции по сейсмостойкому строительству) /Под ред. Полякова С.В. - М.: Стройиздат, 1984. - 255 с.

6. White R.G. Vibration control. (Управление колебаниями.) //Noise and Vibr., Chchester etc., 1989, p.685-712.

7. Черепинский, Ю.Д. К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1972. - № 3. – С. 13-15.

8. Лурье, А.И. Аналитическая механика. – М. Физматгиз, 1961. – 824 с.

9. Неймарк, Ю.И., Фуфаев НА. Динамика неголономных систем. – М.: Наука, 1967. 520 с.

10. Lobas, L.G. On rolling system // Int. Appl. Mech., 2000. – 36, №5. – P. 691-696.

11. Легеза, В.П. Динамика виброзащитных систем с роликовым гасителем низкочастотных колебаний / Легеза В.П. // Проблемы прочности, 2004. – №2. – С. 106-118.

12. Легеза, В.П., Ахметов Ю.Г. Эффективность виброзащитной системы с циклоидальным катковым сейсмоамортизатором // Изв. РАН. Механика твердого тела, 2006. - №4. – С.56-68.

13. Легеза, В.П. Эффективность виброзащитной системы с изохронным роликовым гасителем // Изв. РАН. Механика твердого тела, 2013. - №2. – С.65-76.