

УДК 629.12

**УРАВНЕНИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ КАРКАСА В ВИДЕ
МНОГОПРОЛЕТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РАМЫ С ПОМОЩЬЮ
ПЕРЕКРЕСТНОЙ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СВЯЗЕЙ ПРИ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

Шеин Александр Иванович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Быков Александр Николаевич,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

аспирант.

Аннотация

Исследовался процесс демпфирования сейсмических колебаний железобетонного каркаса одноэтажного промышленного здания. Составлены уравнения движения системы, эквивалентной движению железобетонной рамной системы с вертикальными перекрестными связями, оборудованными гидравлическими демпферами. Решение дифференциальных уравнений движения демпфируемой системы позволяет определить максимальные горизонтальные перемещения диска покрытия, соответствующую данному коэффициенту сопротивления движению отклоняющую силу и проверить управляющую колонну на срез. Организуя цикл решений с измененным сопротивлением движению и/или параметрами колонн можно подобрать оптимальные для данных возмущений коэффициент сопротивления движению и характеристики колонн. Показан алгоритм поиска безопасного включения колонн в работу демпфируемой системы связи-каркас и снижения уровня колебаний каркаса.

Ключевые слова: демпфирование, колебания, вертикальные связи, железобетонный каркас одноэтажного промышленного здания, дифференциальные уравнения движения, сейсмограмма, сейсмическая защита

QUATIONS FOR DAMPING VIBRATIONS OF A MULTIPLE-STOREY CONCRETE FRAME USING A CROSS-DAMPING SYSTEM OF BOUNDARIES IN SEISMIC CONDITIONS

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics.

Bykov Alexander Nikolaevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

graduate student.

Annotation

The process of damping seismic vibrations of a reinforced concrete frame of a single-storey industrial building was studied. Equations of motion of a system equivalent to the motion of a reinforced concrete frame system with vertical cross-links equipped with hydraulic dampers were compiled. The solution of the differential equations of motion of the damped system allows us to determine the maximum horizontal displacements of the cover disk, the deflecting force corresponding to a given coefficient of resistance to motion, and to check the control column for shear. By organizing a cycle of solutions with changed resistance to movement and/or column parameters, it is possible to select the optimal resistance to movement coefficient and column characteristics for given disturbances. The algorithm for finding a safe way to include the columns in the damping system of the frame and reduce the level of frame vibrations is shown.

Keywords: damping, vibrations, vertical connections, reinforced concrete frame of a single-storey industrial building, differential equations of motion, seismogram, seismic protection

Различные способы демпфирования колебаний механических систем рассмотрены в работах [1..15]. В данной статье приведены уравнения движения железобетонной рамной системы с вертикальными перекрестными связями, оборудованными гидравлическими демпферами. При землетрясениях в перекрытиях каркасных зданий (рис.1), из-за их большой массы, генерируются значительные силы инерции, вызывающие движение диска покрытия. Традиционные перекрестные связи, предназначенные для повышения устойчивости каркаса, оказываются слабым звеном: они либо теряют устойчивость и рвутся, либо, будучи слишком прочными, передают чрезмерные нагрузки на колонны, разрушая их. Связи, оборудованные демпферами, в отличие от обычных вертикальных связей, эффективно гасят энергию колебаний, защищая каркас от повреждений, и кроме того, позволяют в значительной степени задействовать в работе изгибную жесткость колонн.

Рассмотрим движение каркаса под воздействием вектора пространственной (трехмерной) системы переносных ускорений $\bar{\ddot{A}}$. Будем полагать, что максимальное горизонтальное ускорение ориентировано вдоль линии колонн каркаса. Очевидно, что вертикальная составляющая оказывает влияние на каждую ферму (или балку) в отдельности и защищает от вертикальных сейсмических воздействий нужно каждую ферму или балку и колонны в плоскости фермы. При этом вполне можно использовать традиционные динамические гасители колебаний. А горизонтальная составляющая переносного ускорения, в силу большой длины и скорости волны, одновременно воздействует на все колонны каркаса. Горизонтальные перемещения узлов покрытия из-за значительной жесткости диска покрытия практически одинаковы. Поэтому расчетную схему каркаса на действие горизонтальных переносных воздействий

можно представить одной, работающей из плоскости фермы, колонной эквивалентной ряду колонн жесткости с массой, равной массе диска покрытия с грузовой полосы, эквивалентной по ширине грузовой полосе для определения статической нагрузки на колонну.

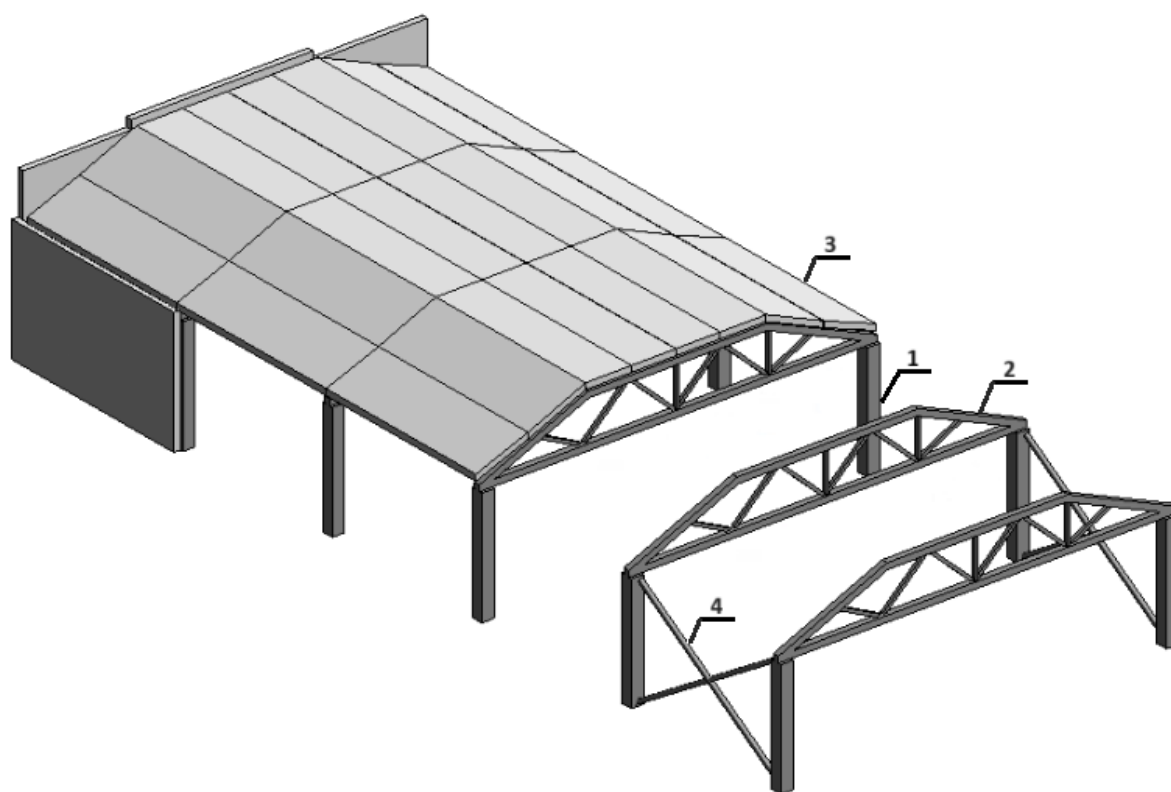


Рисунок 1 - Общий вид железобетонного каркаса:

1 – колонна; 2 – ферма; 3 – плиты покрытия;
4 – стальные связи.

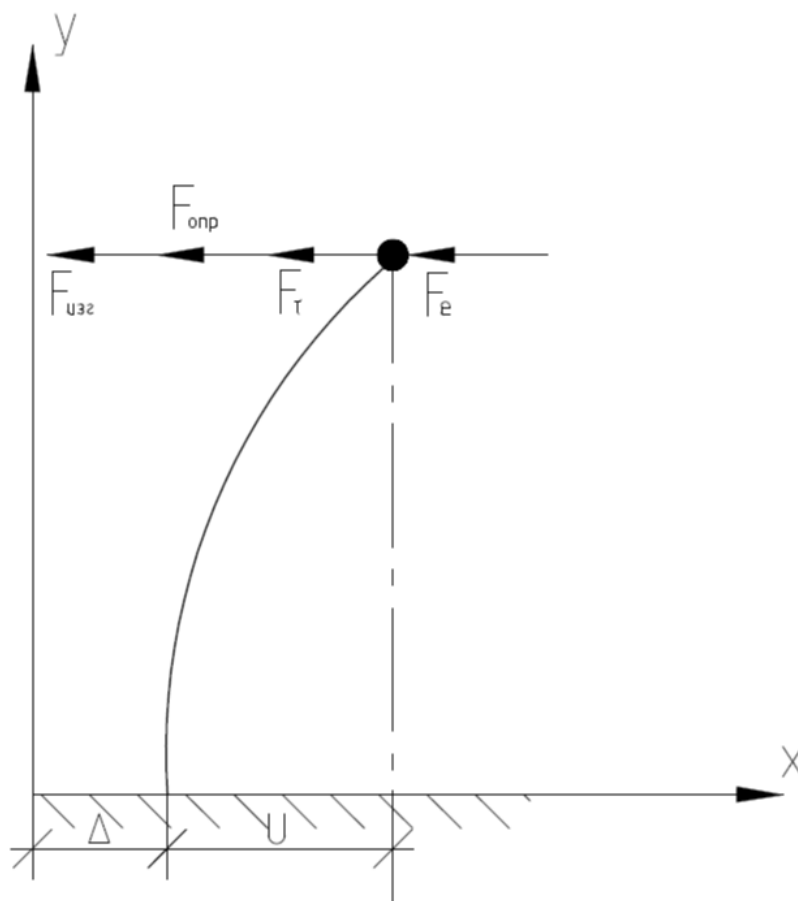


Рисунок 2 – Динамическая расчетная схема

Пусть известны исходные геометрические и механические параметры каркаса и армирование колонн, а также коэффициент сопротивления движению жидкости гидроцилиндра.

Приведенная жесткость колонны из плоскости фермы может быть определена из соотношения

$$E_{пр}I = \sum_{i=1}^N E_{пр,i}I_i, \quad (1)$$

где $E_{пр,i}$ – приведенные модули упругости железобетонных колонн ряда, I_i – моменты инерции этих колонн, N – количество колонн ряда.

Уравнение динамического равновесия для движущейся массы диска можно записать в виде:

$$\bar{F}_{\tau} + \bar{F}_{сопр} + \bar{F}_{изг} + \bar{F}_{е} = 0, \quad (2)$$

где $\bar{F}_\tau$ – сила инерции относительного движения диска, $\bar{F}_{сопр}$ – сила сопротивления движению демпферов, $\bar{F}_{изг}$ – сила упругости от изгиба управляющей колонны, $\bar{F}_e$ – сила инерции переносного, возмущающего, движения.

Перепишем уравнение (2) в проекции на горизонтальную ось в зависимости от кинематических характеристик движения диска покрытия:

$$m\ddot{u} + \alpha\dot{u} + ku = -m\ddot{\Delta}. \quad (3)$$

Здесь m – приведенная масса полосы покрытия, α – приведенный горизонтальной оси коэффициент сопротивления движению демпфера на наклонной связи, k – изгибная жесткость управляющей колонны.

Т.к. акселерограмма землетрясения $\ddot{\Delta}$ – нестационарная вектор функция переносных ускорений, решение будем искать прямыми методами (метод Ньюмарка, метод центральных разностей). Ищем максимальное значение перемещения $u_{\max}$.

Учитывая, что сила, вызывающая это перемещение может быть определена из соотношения:

$$\delta_{11}F = u_{\max}, \quad (4)$$

находим соответствующую поперечную силу в управляющей колонне:

$$Q_d = u_{\max} / (\delta_{11} \cdot N). \quad (5)$$

Расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие поперечных сил для элементов постоянной высоты сечения, армированных хомутами, нормальными к оси элемента выполним по наклонному сечению из условия

$$Q = Q_b + Q_{sw}, \quad (6)$$

где Q – поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции C от внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, при нагрузке, приложенной к боковой грани элемента.

Q_b – поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении;

Q_{sw} – поперечная сила, воспринимаемая хомутами в наклонном сечении.

$$Q = (1,5R_{bt} \cdot b \cdot h^2) / c + 0,75R_{sw} \cdot A_{sw} \cdot c / S_w, \quad (7)$$

где параметр C подбирается в границах

$$h_0 \leq c \leq 2h_0 \quad (8)$$

так, чтобы значение Q было минимальным. Здесь R_{bt}, b, h – прочность бетона и размеры сечения колонны; R_{sw}, A_{sw}, S_w – прочность, площадь сечения и шаг хомутов поперечной арматуры.

Если $Q_d > Q$, то увеличиваем сопротивление движению или сечение (армирование) колонн и повторяем расчет. Целесообразно одновременно выполнить проверку прогиба колонн из плоскости ферм. При действии постоянных и временных длительных и кратковременных нагрузок прогиб железобетонных колонн не должен превышать $1/75$ вылета консоли, т.е.

$$u_{\max} \leq L / 75, \quad (9)$$

где L – высота колонн.

Если $Q_d \leq Q$ и условие (9) выполняется – заканчиваем расчет. Параметры колонн и коэффициент сопротивления движению гидроцилиндров определены.

После снятия кинематического возмущения система аperiodически закончит движение:

$$u = e^{-nt} (u_0 e^{\sqrt{n^2 - \omega_0^2} t} + (\dot{u}_0 + nu_0) e^{-\sqrt{n^2 - \omega_0^2} t}). \quad (10)$$

Выводы:

1. Показан алгоритм поиска безопасного включения колонн в работу демпфируемой системы связи-каркас и снижения уровня колебаний каркаса.

2. Из цикла решений дифференциальных уравнений движения демпфируемой системы с изменениями сопротивления движению и/или параметров колонн подбираются оптимальные для данных возмущений коэффициент сопротивления движению и характеристики колонн.

Библиографический список:

1. Денисов Е.В. Динамический гаситель колебаний длинномерных конструкций балочного типа / Е.В. Денисов, С.А. Фоменко. // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. Выпуск 8. 2014. URL: <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов%20Е.%20В.%20Динамический%20гаситель%20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. Катпин А. Краткий обзор устройств гашения колебаний / Катпин А., Мойзес // XX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». -Томский политехнический университет, г. Томск
3. Mohammad Froozanfar. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // Journal of Building Engineering. [Volume 84](#), 1 May 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
4. Kai Yang. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers / Kai Yang, Zhenhua Xu, Yijia Ma, Minjun Wu, Zhipeng Zhao, Chao Luo // Structures. Volume 66, August 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>
5. O.A. Burtseva. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // Procedia Engineering. Volume 129, 2015. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313
6. L. Zoccolini. Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art/ L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettorruso, D. Rossi, V. Quaglini // Procedia Structural Integrity. Volume 62, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784>
7. Ayman Abd-Elhamed. Tuned liquid damper for vibration mitigation of

- seismic- excited structures on soft soil / Ayman Abd- Elhamed, Mohamed Tol an // Alexandria Engineering Journal. Volume 61, Issue 12, December 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822002253>
8. Шеин А.И. Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионом или гидроцилиндром одностороннего действия / Шеин А.И., Чуманов А.В., Земцова О.Г. // Региональная архитектура и строительство № 2(55)/2023. стр. 69-76. Свидетельство о регистрации ПИ ФС77-25956 от 13 октября 2006 г., ISSN 2072-2958;
<https://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3136/Nomer%2055.pdf?sequence=1&isAllowed=y>;
DOI https://doi.org/10.54734/20722958_2023_2_69, RSCI
 9. Shein, A.I. Tape system for damping vibrations of mesh domes with a central mount for seismic impacts / Shein A.I., Chumanov A.V. // International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction./ BuildInTech BIT 2020. Innovations and Technologies in Construction., p.100-107. Scopus
 10. Shein A. I. Belt Vibration Damping System for Closed-Type Domes / Shein A. I., Chumanov A. V. // Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE, vol. 160. P. 245-252(2021). Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future, Lecture Notes in Civil Engineering 160, https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_33. Scopus
 11. Шеин А.И., Чуманов В.А. Система перекрестных связей производственных цехов на основе ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия при сейсмических воздействиях / Шеин А.И., Чуманов В.А. // Региональная архитектура и строительство, №2 (59), 2024., с. 143-148.
DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2024_2_143
ISSN: 2072-2958.
 12. Shein, A. Damping seismic vibrations in high-rise buildings using controlled reactive dampers. / Shein, A., Zaitsev, M., Tamrazyan, A., Matseevich, T. (2025). // Architecture and Engineering, No 3 (10), pp. 86–95. DOI: 10.23968/2500-0055-2025-10-3-86-95.
 13. Шеин А.И. Современное состояние проблемы гашения колебаний зданий и сооружений/ Шеин А.И., Быков А.Н.//[Региональная архитектура и строительство](#). 2025. № 3 (64). С. 87-96. DOI 10.54734/20722958_2025_3_87
 14. Шеин А.И. Уравнения движения системы «сооружение – перекрестные демпфирующие связи» при сейсмических возмущениях / Шеин А.И., Быков А.Н. // [Региональная архитектура и строительство](#). 2025. № 2 (63). С. 150-96. DOI 10.54734/20722958_2025_2_150

15.Шеин А.И. Реактивный гаситель колебаний сооружений. Патент на изобретение RU 2839323. С1, 29.04.2025, /Шеин А.И., Зайцев М.Б., Чуманов А.В.//Заявка № 2024110965. Приоритет от 19.04.2024