

УДК 629.12

**ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ МНОГОЭТАЖНОЙ
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. Построена математическая модель расчета многоэтажной железобетонной рамной системы с вертикальными перекрестными связями, оборудованными тросовыми или трубчатыми гидравлическими демпферами. Приведены результаты численного расчета рамной системы с демпфирующими связями. Показан эффект снижения уровня колебаний системой вертикальных связей с демпферами.

Ключевые слова: демпфирование, колебания, вертикальные связи, железобетонная многоэтажная рама, дифференциальные уравнения движения МКЭ, сейсмограмма, сейсмическая защита.

**DAMPING OF VIBRATIONS OF A MULTI-STOREY MULTI-SPAN
REINFORCED CONCRETE FRAME USING A CROSS-DAMPING
COUPLING SYSTEM DURING SEISMIC DISTURBANCES**

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department of "Mechanics".

Bykov Alexander Nikolaevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

postgraduate student.

Abstract

The process of damping seismic vibrations of a reinforced concrete frame was investigated. A mathematical model for calculating a multi-storey reinforced concrete frame system with vertical cross-links equipped with cable or tubular hydraulic dampers has been constructed. The results of numerical calculation of a frame system with damping connections are presented. The effect of reducing the vibration level by a system of vertical connections with dampers is shown.

Keywords: damping, vibrations, vertical connections, reinforced concrete multistory frame, differential equations of motion FEM, seismogram, seismic protection.

В работах [1..12] рассматривались различные подходы гашения колебаний механических систем. В данной статье приведено исследование процесса демпфирования сейсмических колебаний железобетонного каркаса с вертикальными перекрестными связями, оборудованными тросовыми или трубчатыми гидравлическими демпферами.

В уровнях перекрытий каркасных зданий сосредоточены значительные нагрузки (массы), которые, при кинематическом возмущении опор создают большие силы инерции переносного движения. А они в свою очередь, вызывают изгибные колебания колонн. Обычные вертикальные перекрестные связи при сейсмическом воздействии обладают серьезными недостатками: они теряют устойчивость и рвутся при малых сечениях и наоборот – разрушают колонны в местах крепления к колоннам при сильно развитых сечениях.

Демпферы же снижают ударную нагрузку на элементы каркаса, не вызывая его разрушений.

При устройстве перекрестной системы связей рассматривались две основные схемы демпфирующих гидроцилиндров: ленточно-тросовая с гидроцилиндрами одностороннего действия и жесткая трубчатая с жесткими штоками и гидроцилиндрами двухстороннего действия.

Стальные тросы сочетают в себе положительные качества высокопрочной проволоки и горячекатаных профилей. Они имеют примерно такую же прочность, как и высокопрочная проволока, практически неограниченную длину, обладают высокой заводской готовностью. Стальные тросы широко применяются в строительстве в качестве несущих элементов для конструкций с большими пролетами, требующих высокой надежности. К ним относятся:

- * висячие покрытия зданий и сооружений;
- * несущие элементы висячих мостов;
- * канаты канатных дорог.

Кроме того, стальные тросы используются в качестве арматуры для:

- * большепролетных сводов;
- * куполов;
- * железобетонных пролетных строений мостов и путепроводов.

В данном случае мы используем стальные канаты в качестве элементов вертикальных связей для многоэтажных многопролетных зданий с железобетонным каркасом. Каждая ветвь этих связей оборудуется гидроцилиндром одностороннего действия.

Второй тип исследуемых вертикальных связей – жесткие трубчатые вертикальные перекрестные связи с жесткими штоками и гидроцилиндрами двухстороннего действия.

Движение механической системы «рама - демпфирующая система связей» описывалось дифференциальным уравнением МКЭ вида:

$$M\ddot{U} + B\dot{U} + KU = -M\ddot{\Delta}, \quad (1)$$

где M – диагональная матрица масс;

U – вектор относительных перемещений;

B – матрица демпфирования (матрица сопротивления движению)

железобетонного каркаса и демпфирующей системы связей;

K – матрица жесткости системы;

$\ddot{\Delta}$ – вектор переносных ускорений, согласно заданной акселерограмме землетрясения.

На рис. 1 и 2 показаны фрагменты связевых отсеков в тросовом и трубчатом исполнении.

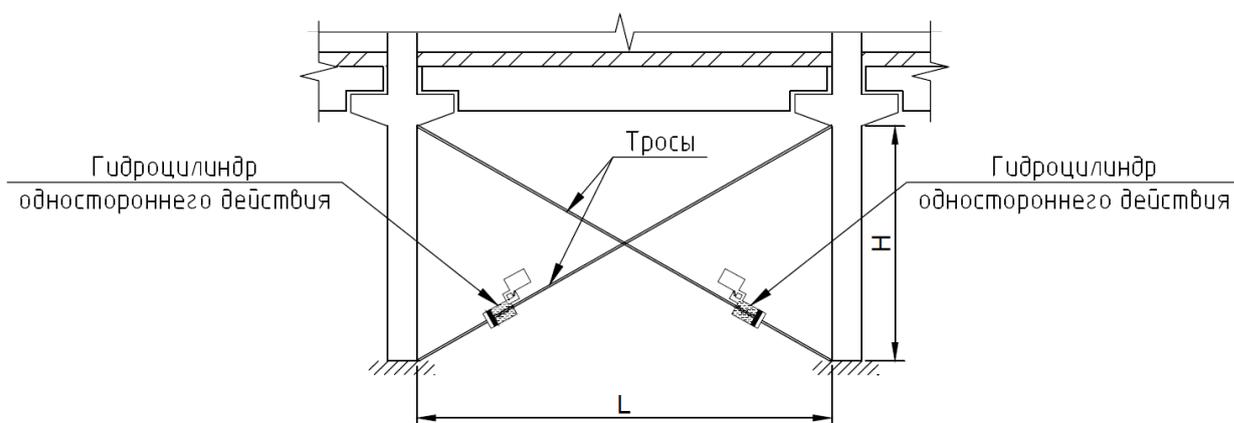


Рисунок 1 - Фрагмент рамы с перекрестной тросовой системой вертикальных связей, оснащенной гидроцилиндрами одностороннего действия

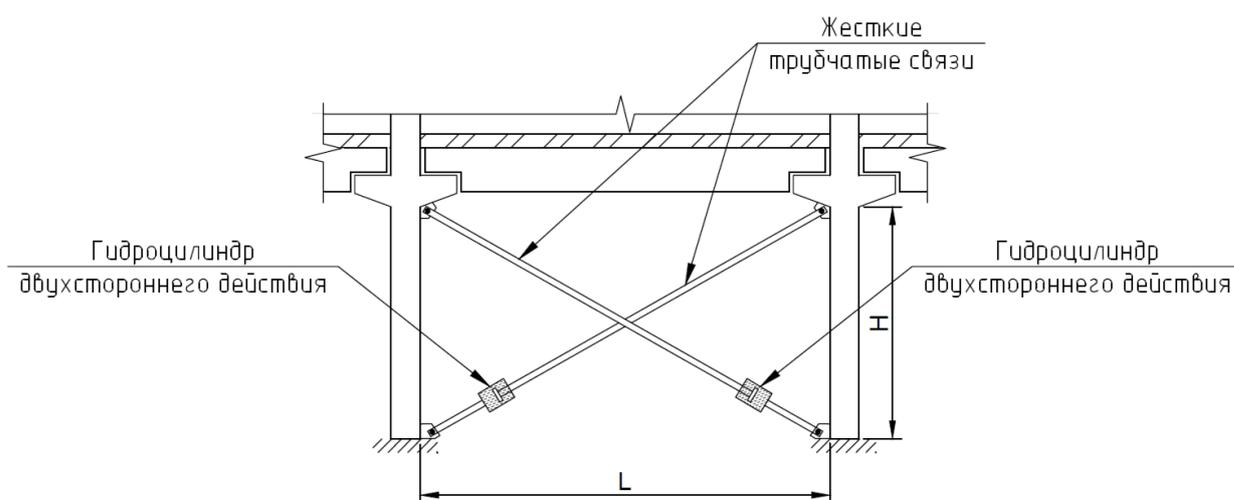


Рисунок 2 - Фрагмент рамы с системой вертикальных связей, выполненной из труб с гидроцилиндрами двустороннего действия

При определении перемещений узлов каркаса в каждый момент времени применялся метод центральных разностей. При этом ускорения и скорости перемещений узлов для данного момента времени будут выражены соотношениями:

$$\ddot{U}_t = \frac{U_{t+\Delta t} - 2 \cdot U_t + U_{t-\Delta t}}{(\Delta t)^2}, \quad \dot{U}_t = \frac{U_{t+\Delta t} - U_{t-\Delta t}}{2\Delta t}; \quad (2,3)$$

где $U_{t+\Delta t}$ – перемещение в следующий момент времени, м; U_t – перемещение в данный момент времени, м; $U_{t-\Delta t}$ – перемещение в предыдущий момент времени, м; Δt – шаг времени, с.

На каждом шаге по времени определяем:

$$U_{t+\Delta t} = [M / (\Delta t)^2 + B / (2\Delta t)]^{-1} \cdot [-M\ddot{A}_t - K \cdot U_t - M(U_{t-\Delta t} - 2U_t) / (\Delta t)^2 + BU_{t-\Delta t} / (2\Delta t)]. \quad (4)$$

Для большей наглядности численных экспериментов с гидравлическими демпферами, демпфирующий эффект собственно железобетонного каркаса не учитывался, и матрица демпфирования собиралась только для узлов с гидроцилиндрами.

Будем полагать, что коэффициент сопротивления движению вязкой жидкости определяется соотношением:

$$\alpha = 1256\mu/A_p^2 / (\pi d^4), \quad (5)$$

в размерности $[Па \cdot с]$. Здесь μ – коэффициент вязкости, l – длина отверстия, A_p – площадь поршня, d – диаметр отверстия.

Для перекрестной системы с жесткими (трубчатыми) связями рассеивание энергии движения в обоих демпферах каждого этажа происходит непрерывно во все время движения. Для перекрестной системы связей с тросами и гидроцилиндрами одностороннего действия демпфер участвует в работе только при увеличении растяжения троса. При невыполнении этого условия движение происходит в условиях отсутствия сопротивления движению в гидроцилиндре (холостой ход).

Численные исследования.

Расчет выполнялся по акселерограмме землетрясения произошедшего 25.05.2001 в 105 км юго-восточнее тихоокеанского побережья острова Итуруп, оцененного в 8 баллов по MSK-64 (с максимальными ускорениями порядка 6 м/с^2 . (рис.1).

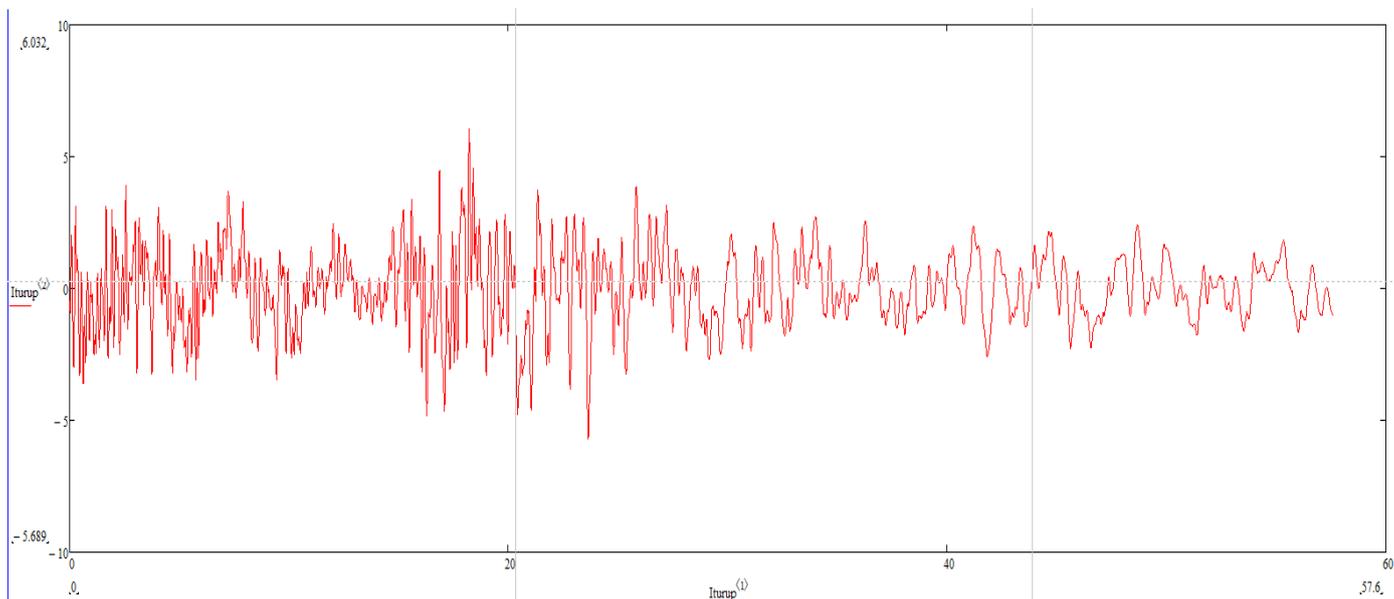


Рисунок 3 - Акселерограмма землетрясения

Исходные данные для численного расчета (трехпролетная трехэтажная железобетонная рама пролетом 6 м с системой перекрестных связей): Колонны железобетонные сечением 400×400 , балки выполнены из железобетона сечением 300×600 . Вертикальные связи в первом варианте расчетной схемы (рис. 4) выполнены из металлической трубы сечением $100 \times 100 \times 4$, во втором варианте расчетной схемы из металлического троса диаметром 25 мм.

Решение дифференциального уравнения движения выполнялось методом центральных разностей с шагом по времени $\Delta t = 0,0005 \text{ с}$ в течении промежутка времени 50 с.

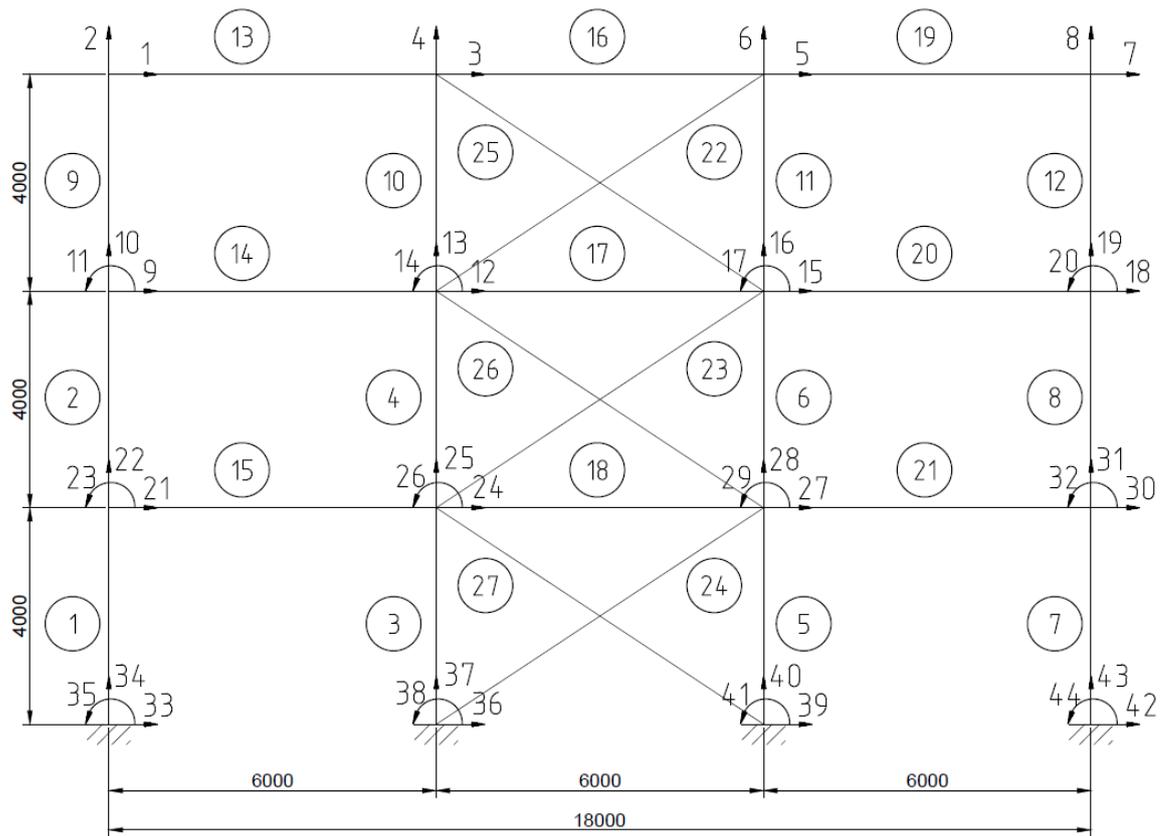


Рисунок 4 - Расчетная схема рамы с пролетом 6 м.

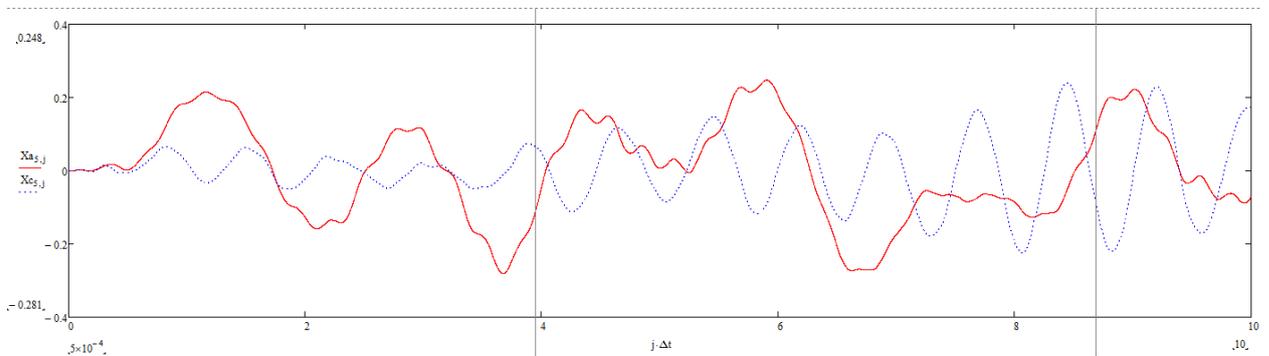


Рисунок 5 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (синий цвет) и для системы без связей (красный цвет) на уровне третьего этажа

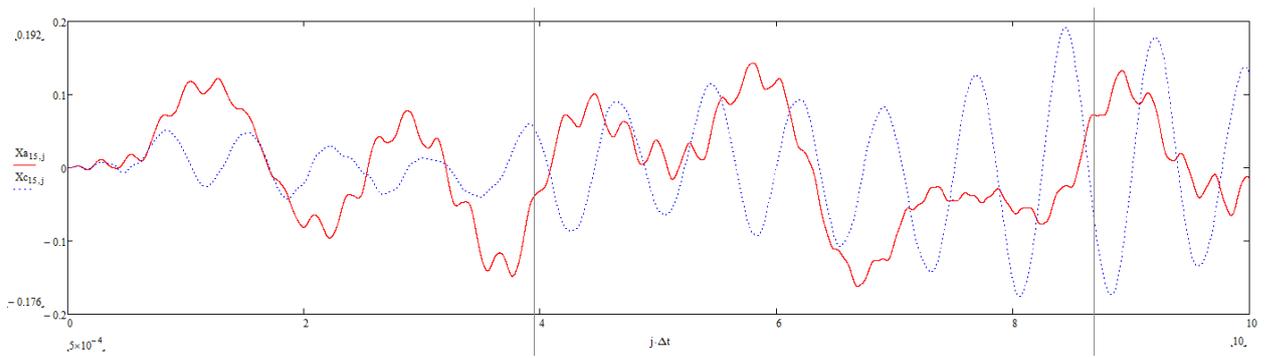


Рисунок 6 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (синий цвет) и для системы без связей (красный цвет) на уровне второго этажа

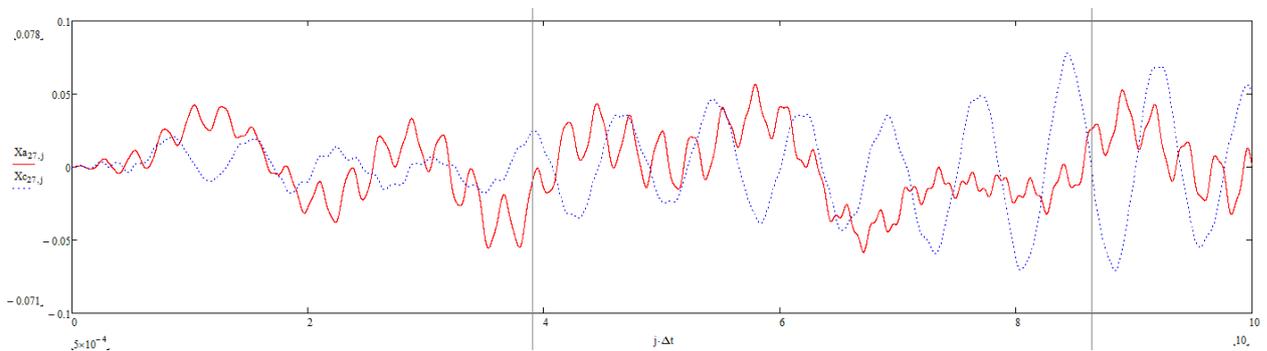


Рисунок 7 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (синий цвет) и для системы без связей (красный цвет) на уровне первого этажа

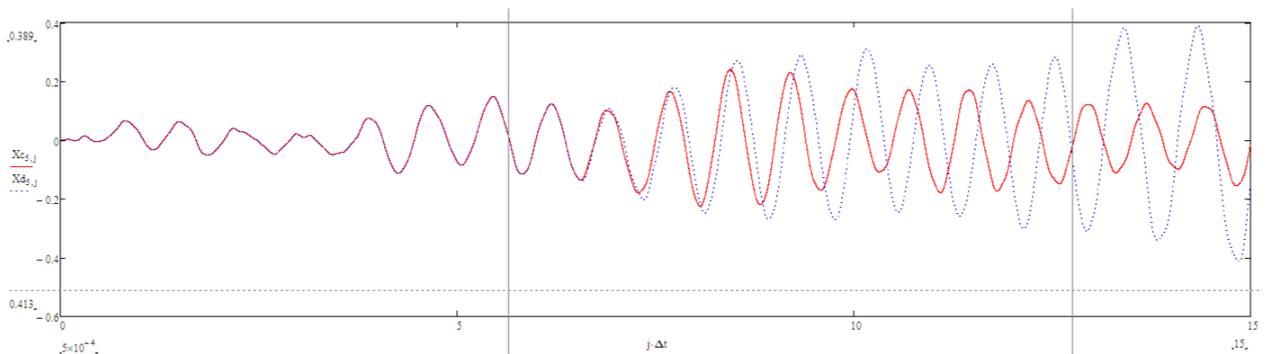


Рисунок 8 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (красный цвет) и для системы с жесткими трубчатыми связями, работающими под предельной нагрузкой (синий цвет) на уровне третьего этажа.

После превышения критических параметров устойчивости или прочности вертикальной связи на одном из этажей, происходит разрыв сначала одного троса, а затем разрыв второго троса на этаже. На рис. 8. после 7,3 секунд

наблюдается разрыв одного из тросов рамной системы, что в последствии вызывает обрыв второго троса рамы и увеличение перемещений системы, работающей уже как система без вертикальных связей.

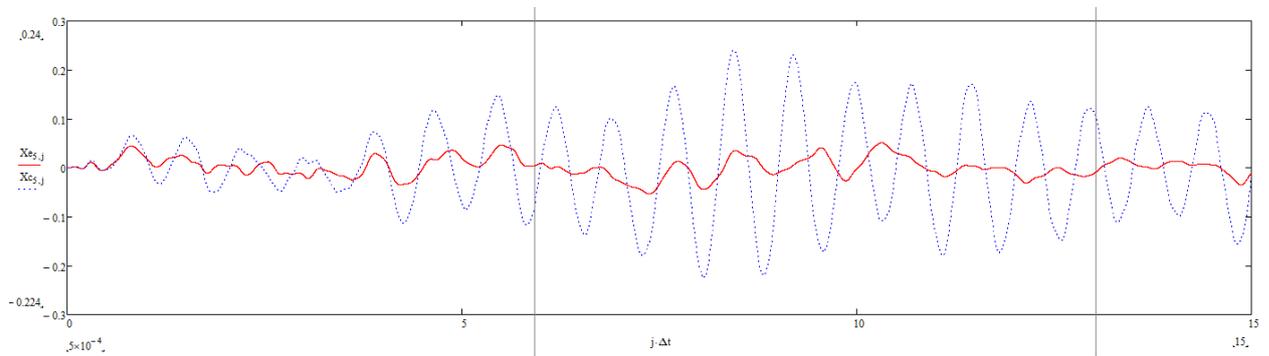


Рисунок 9 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (красный цвет) и для системы с жесткими трубчатыми связями (синий цвет) на уровне третьего этажа

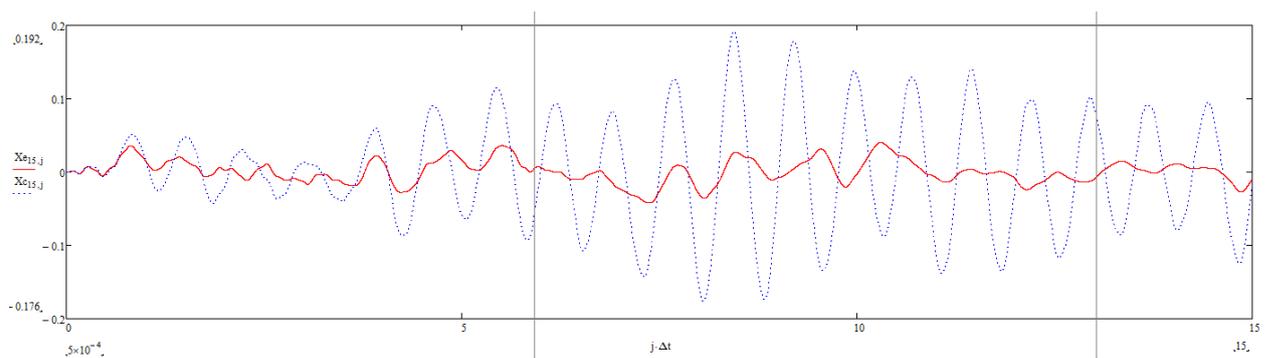


Рисунок 10 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (красный цвет) и для системы с жесткими трубчатыми связями (синий цвет) на уровне второго этажа

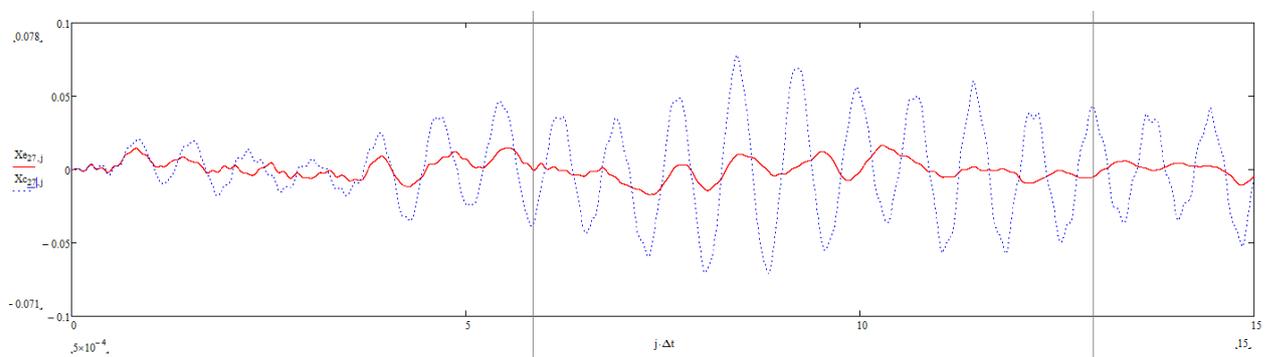


Рисунок 11 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (красный цвет) и для системы с жесткими трубчатыми связями (синий цвет) на уровне первого этажа

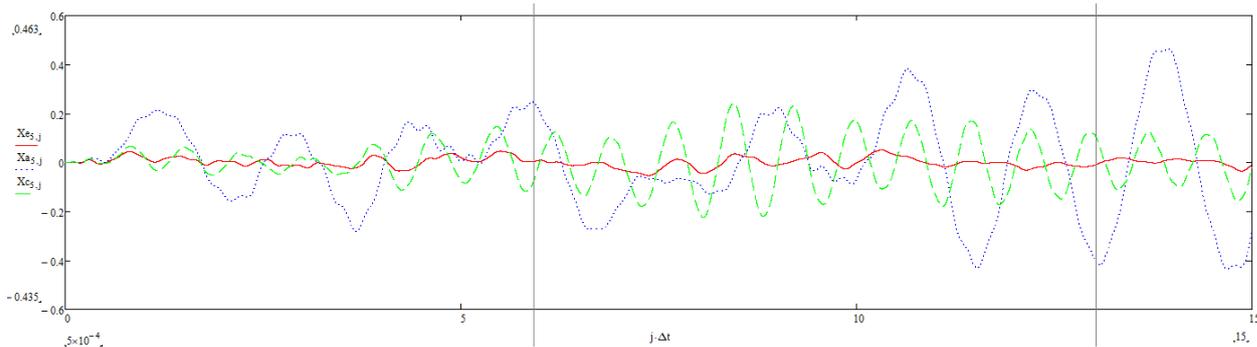


Рисунок 12 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (красный цвет) и для системы с жесткими трубчатыми связями (зеленый цвет) и системой без связей (синий цвет) на уровне третьего этажа

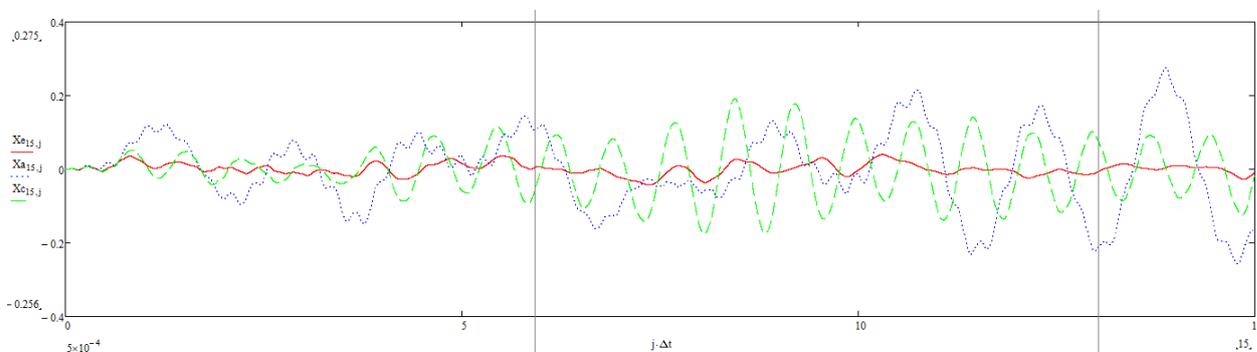


Рисунок 13 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (красный цвет), для системы с жесткими трубчатыми связями (зеленый цвет) и системы без связей (синий цвет) на уровне второго этажа

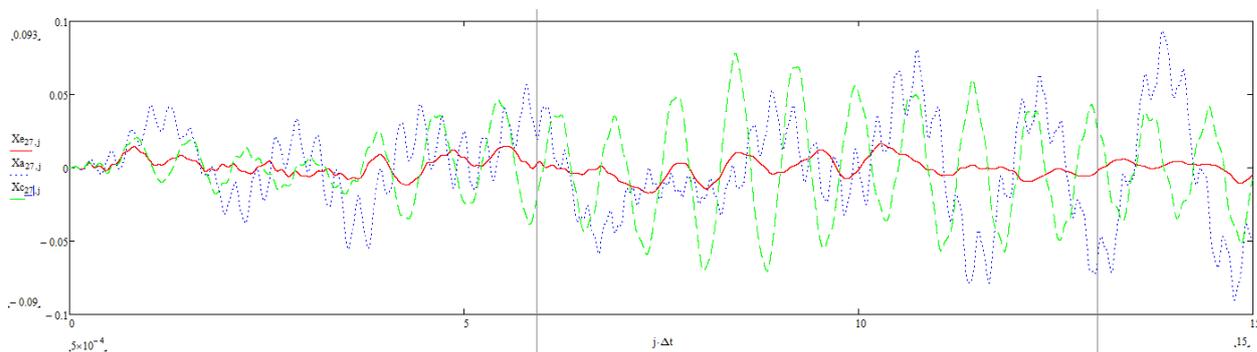


Рисунок 14 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (красный цвет), для системы с жесткими трубчатыми связями (зеленый цвет) и системы без связей (синий цвет) на уровне первого этажа

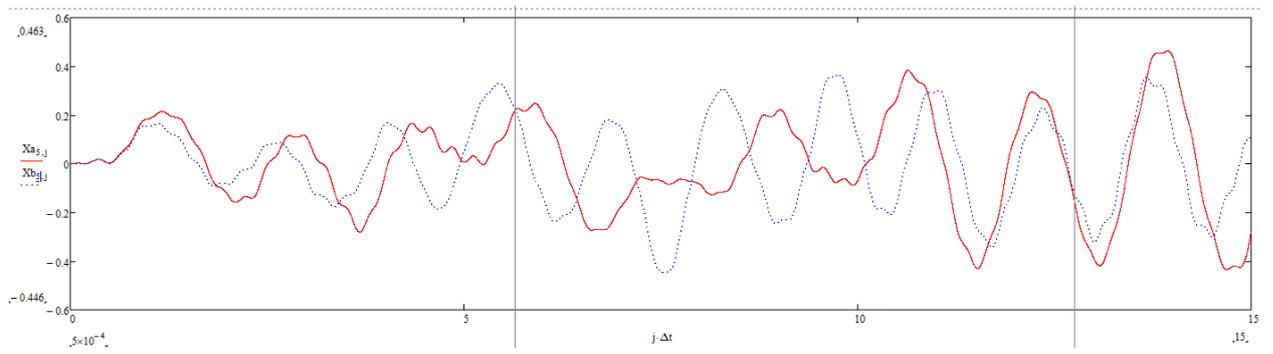


Рисунок 15 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (синий цвет) и системы без связей (красный цвет) на уровне третьего этажа

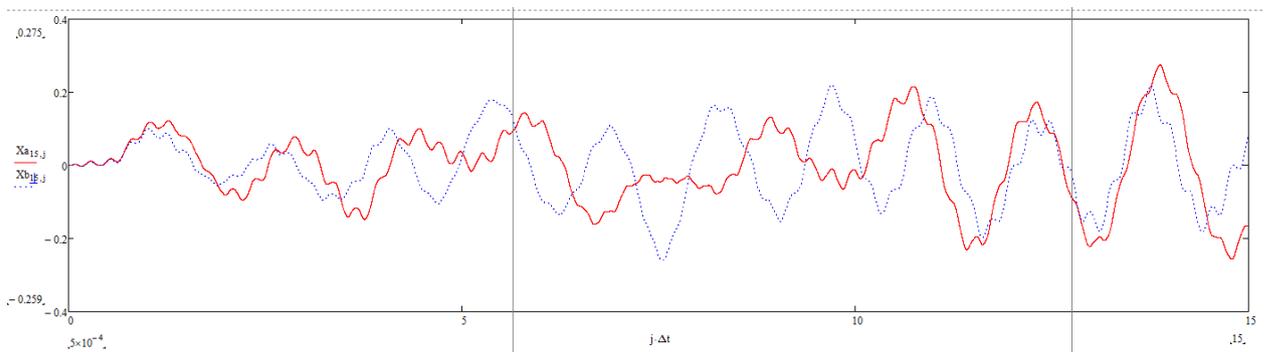


Рисунок 16 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (синий цвет) и системы без связей (красный цвет) на уровне второго этажа

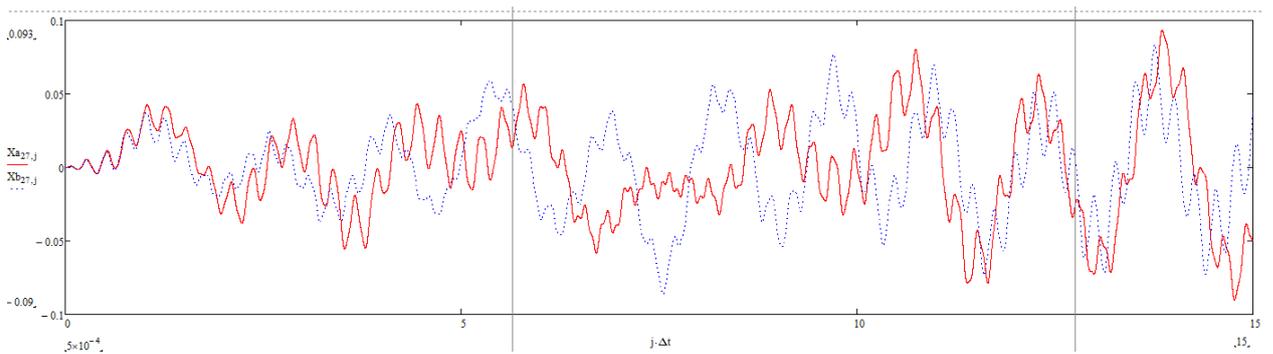


Рисунок 17 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (синий цвет) и системы без связей (красный цвет) на уровне третьего этажа

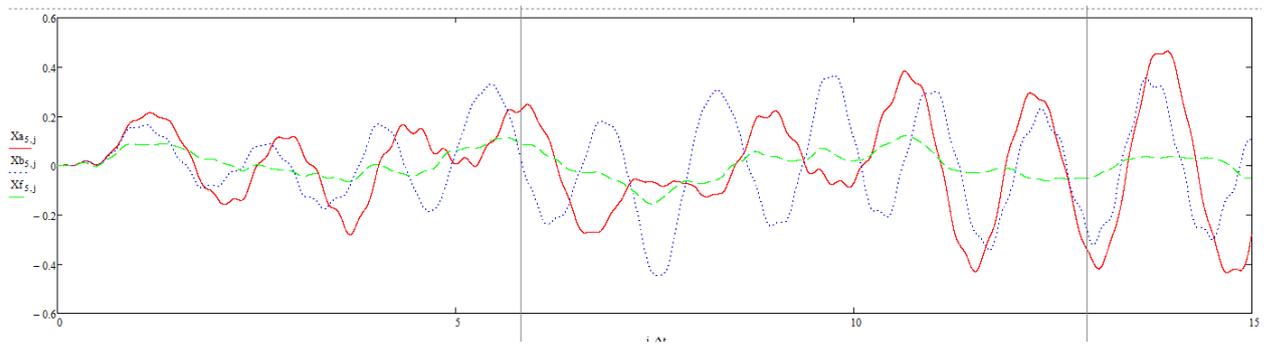


Рисунок 18 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (синий цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с тросами и гидроцилиндрами (зеленый цвет) на уровне третьего этажа

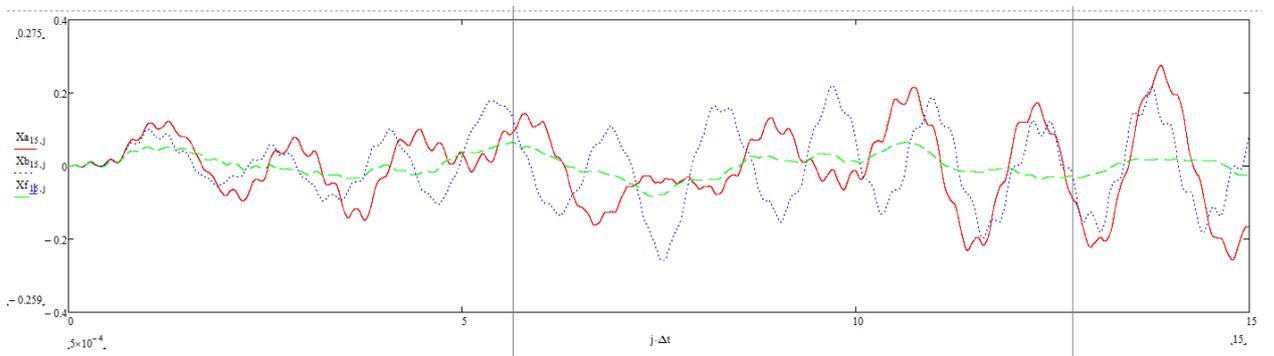


Рисунок 19 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (синий цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с тросами и гидроцилиндрами (зеленый цвет) на уровне второго этажа

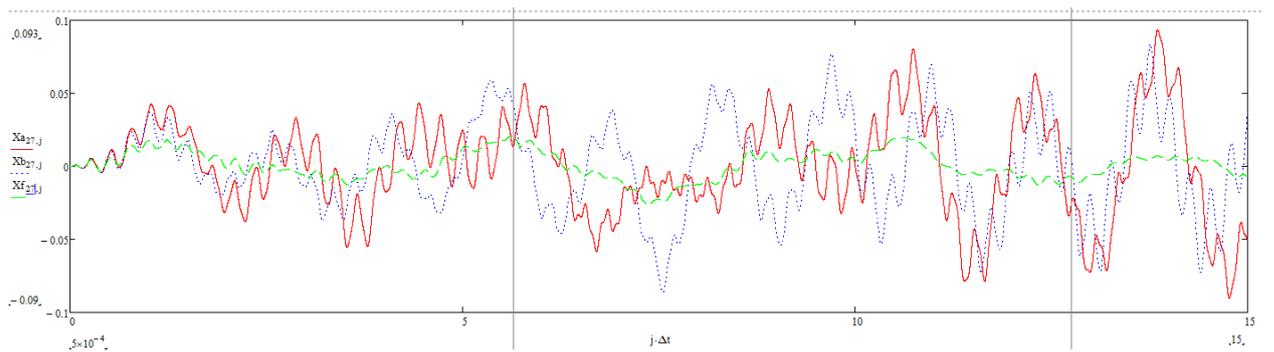


Рисунок 20 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (синий цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с тросами и гидроцилиндрами (зеленый цвет) на уровне первого этажа

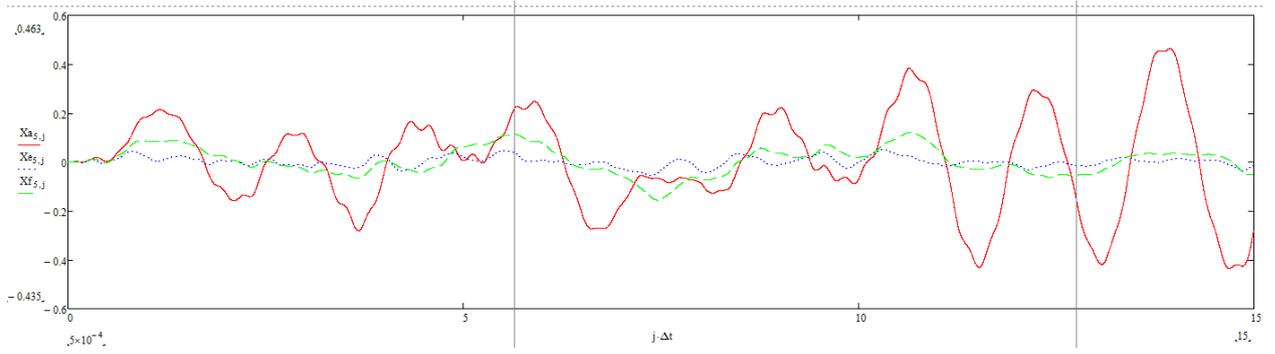


Рисунок 21 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами и гидроцилиндрами (зеленый цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (синий цвет) на уровне третьего этажа

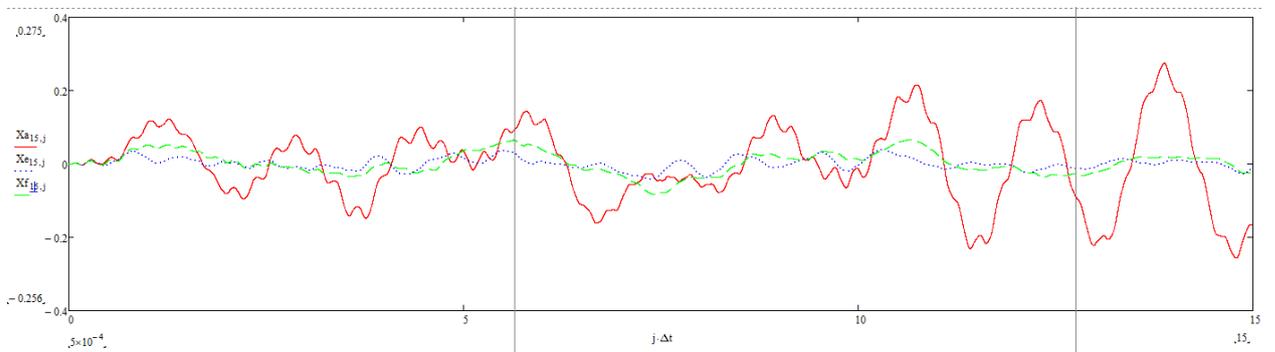


Рисунок 22 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами и гидроцилиндрами (зеленый цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (синий цвет) на уровне второго этажа

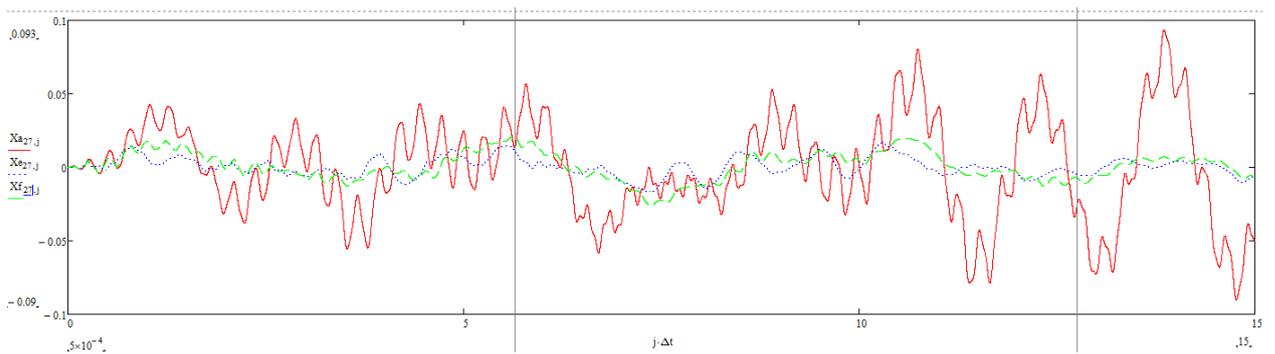


Рисунок 23 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами и гидроцилиндрами (зеленый цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (синий цвет) на уровне первого этажа

Исходные данные для численного расчета (трехпролетная трехэтажная железобетонная рама пролетом 12 м. с системой перекрестных связей): Колонны железобетонные сечением 400x400, балки выполнены из железобетона сечением 280x890. Вертикальные связи в первом варианте расчетной схемы (рис. 24) выполнены из металлической трубы сечением 100x100x4, во втором варианте расчетной схемы из металлического троса диаметром 25 мм.

Расчет выполнялся методом центральных разностей с шагом по времени $\Delta t = 0,0005$ с в течении промежутка времени 50 с.

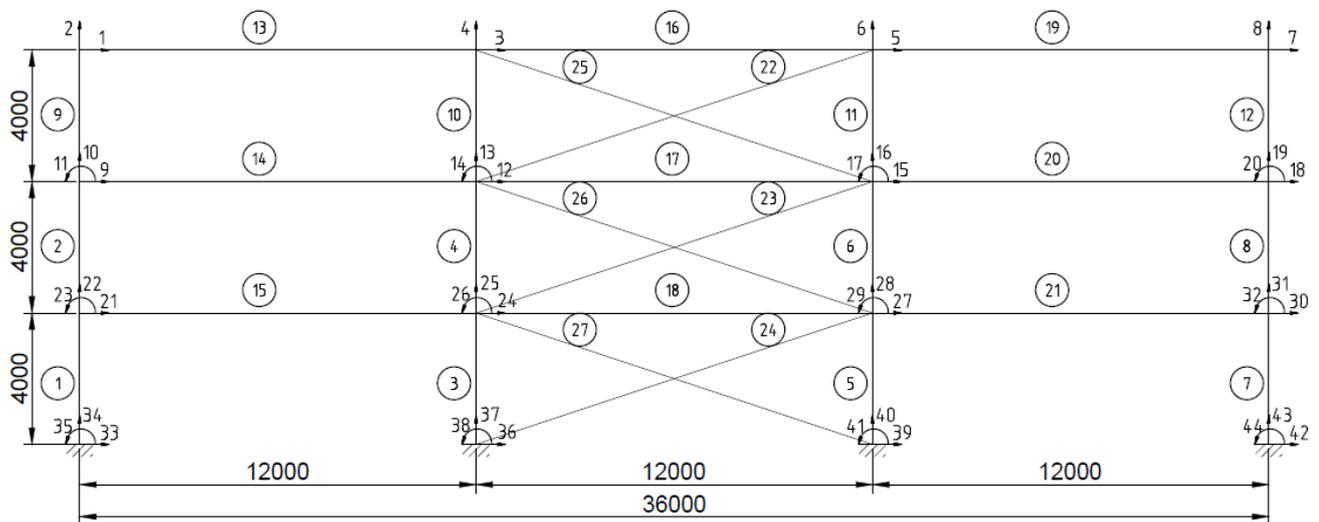


Рисунок 24 - Расчетная схема рамы с пролетом 12 м.

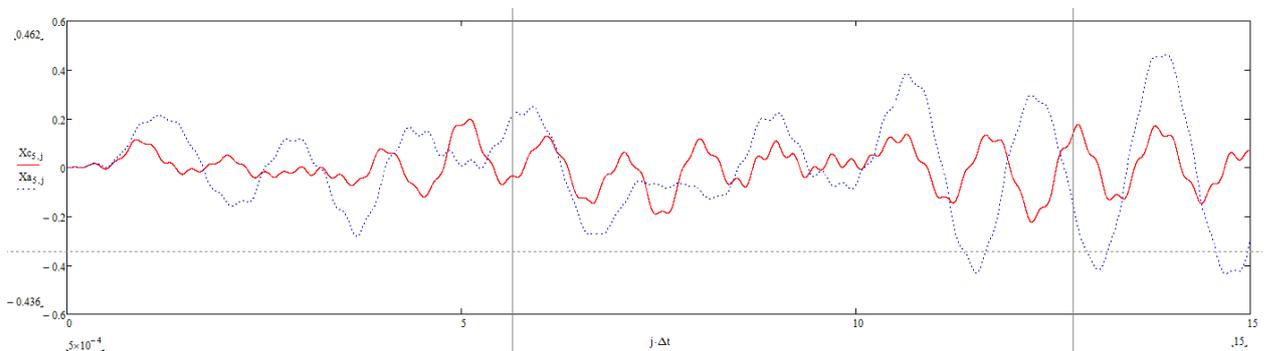


Рисунок 25 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (красный цвет) и для системы без связей (синий цвет) на уровне третьего этажа

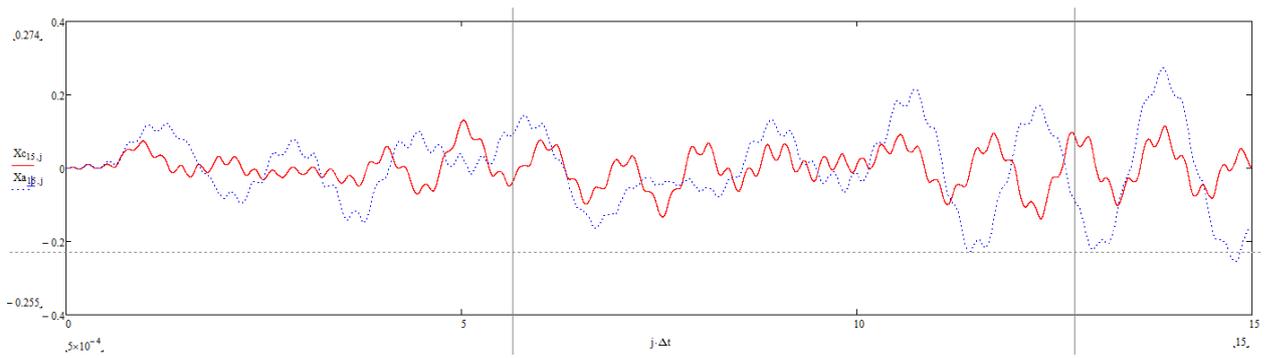


Рисунок 26 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (красный цвет) и для системы без связей (синий цвет) на уровне второго этажа

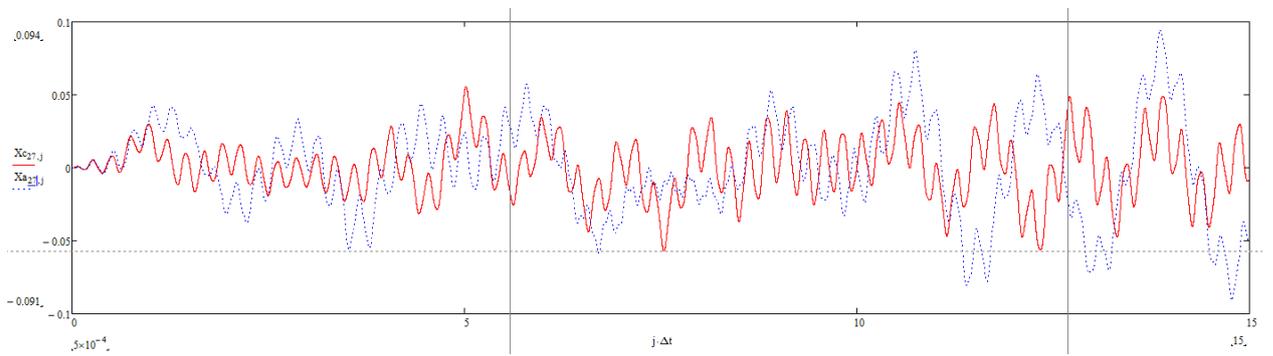


Рисунок 27 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с жесткими трубчатыми связями (красный цвет) и для системы без связей (синий цвет) на уровне первого этажа

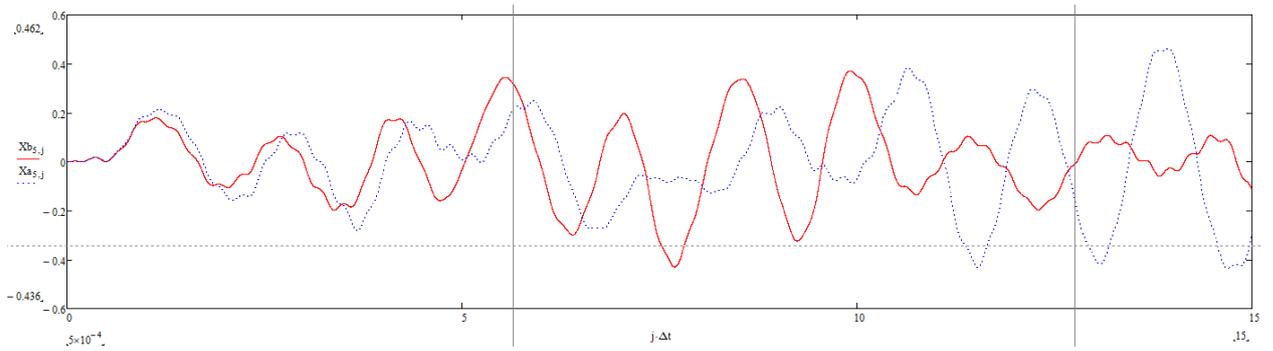


Рисунок 28 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (красный цвет) и системы без связей (синий цвет) на уровне третьего этажа

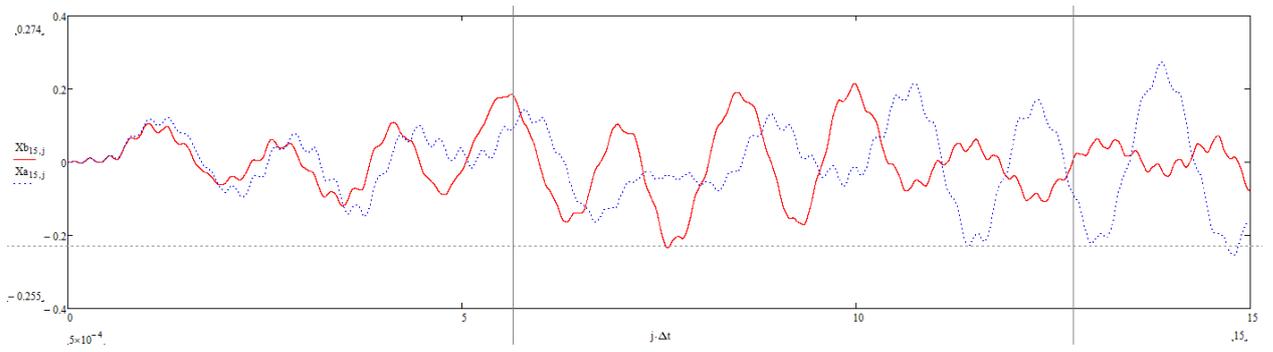


Рисунок 29 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (красный цвет) и системы без связей (синий цвет) на уровне второго этажа

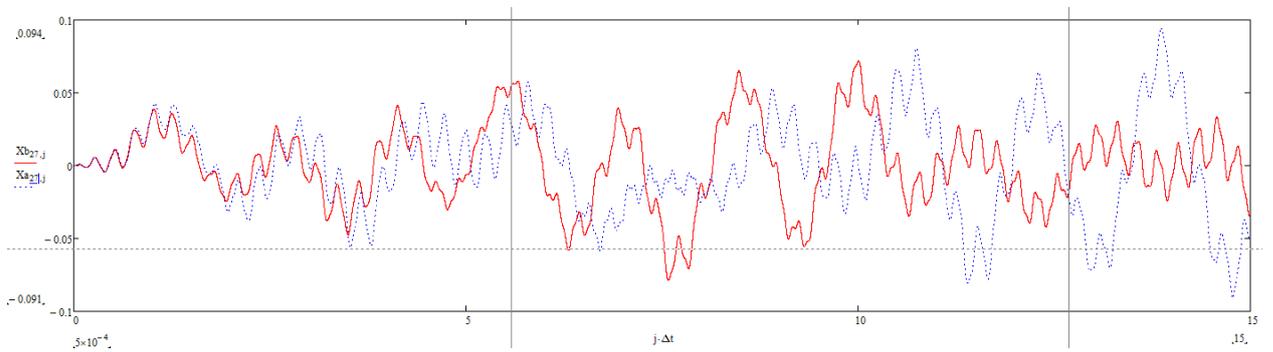


Рисунок 30 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами (красный цвет) и системы без связей (синий цвет) на уровне первого этажа

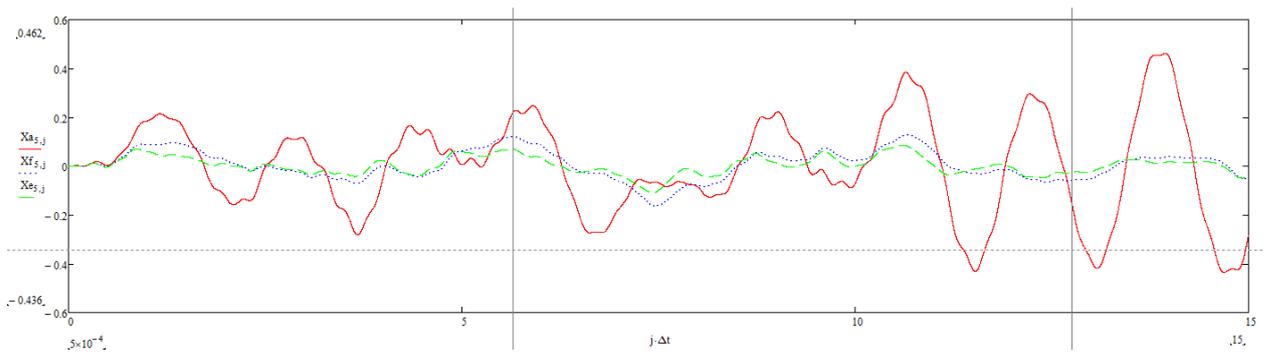


Рисунок 31 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами и гидроцилиндрами (синий цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (зеленый цвет) на уровне третьего этажа

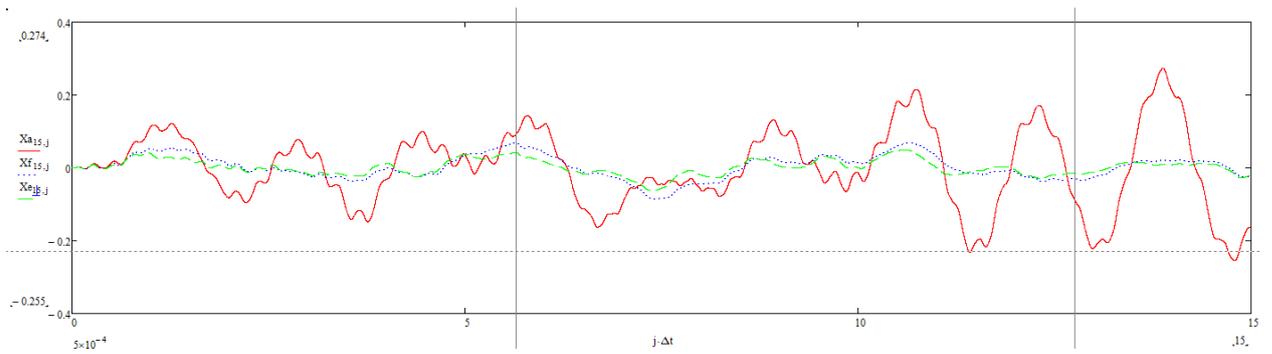


Рисунок 32 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами и гидроцилиндрами (синий цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (зеленый цвет) на уровне второго этажа

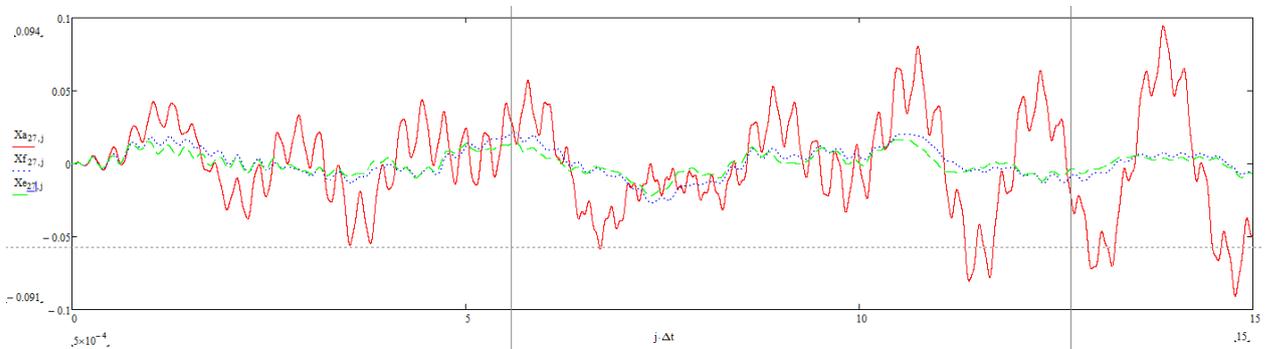


Рисунок 33 - Сравнение графиков зависимости перемещений от времени для системы с тросами и гидроцилиндрами (синий цвет), системы без связей (красный цвет) и системы с жесткими трубчатыми связями и гидроцилиндрами (зеленый цвет) на уровне первого этажа

Таблица 1 – Сравнительная таблица эффективности уменьшения колебаний относительно расчетной схемы без связей

	Расчетная схема	Первый этаж (%)	Второй этаж (%)	Третий этаж (%)	Средний процент эффективности (%)
1	Рама с трубами	18,6	30,6	48,3	32,5
2	Рама с тросами	24	22,9	19,7	22,2
3	Рама с тросовыми гидроцилиндрами	74,3	72,1	69,1	71,8
4	Рама с трубчатыми гидроцилиндрами	81,4	84,5	88,3	84,7

Из таблицы 1 видно, что система с трубами в среднем на 10-20% эффективнее снижает значения перемещений системы от сейсмической нагрузки. Система с тросовыми и трубчатыми гасителями колебаний на 50-60% эффективнее справляется со снижением перемещений системы. Если сравнивать гашение колебаний тросовых и трубчатых демпферов, то можно отметить, что система с трубчатым демпфером в среднем на 15% эффективнее тросовой.

Выводы.

Построена математическая модель расчета многоэтажной железобетонной рамной системы с перекрестными связями, оборудованными тросовыми или трубчатыми гидравлическими демпферами.

Построена математическая модель расчета железобетонной рамной системы с перекрестными связями пролетами 6 и 12м., оборудованной тросовыми или трубчатыми демпферами. Приведены результаты численного расчета различных вариаций железобетонной рамной системы: с жесткими перекрестными трубчатыми связями, системой без связей, системой с тросами, а также тросовые или трубчатые системы, оборудованные гидравлическими демпферами одностороннего и двухстороннего действия.

Показан эффект снижения уровня колебаний системой вертикальных связей с демпферами. Сопоставление канатных и трубчатых систем показывает близкие значения демпфированных перемещений с небольшим преимуществом трубчатой системы с гидроцилиндрами двухстороннего действия в двух вариантах рамы. Однако нужно отметить, что тросовая система связей более надежна в эксплуатации, нежели трубчатая.

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 Tolan / Alexandria Engineering Journal. Volume 61, Issue 12, December 2022. URL: h

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822002253>

8. Alexander Shein and Alexander Chumanov, Modified method of variable elasticity parameters for solving problems of dynamics of rod systems taking into account physical and geometric nonlinearities / Shein A.I., Chumanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 960, 5th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium – WMCAUS 15-19 June 2020, Prague, Czech Republic 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 960 042066. Scopus

9. 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

10. 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

11. 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

12. 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.