УДК 624.042.8.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИНТЕГРАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВЯЗЕЙ ОДНОЭТАЖНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО КАРКАСА

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 кафедры «Механика».

Аннотация

Статья посвящена повышению механической безопасности железобетонных промышленных каркасов при сейсмических, ветровых и динамических воздействиях. В качестве альтернативы традиционным стальным связям, теряющим устойчивость при знакопеременных нагрузках, предложена интегральная пространственная система демпфирования. Она состоит из трех подсистем тросовых связей с гидроцилиндрами одностороннего действия, обеспечивающих гашение колебаний в продольном, поперечном и вертикальном направлениях. Разработана и численно реализована математическая модель динамики каркаса, учитывающая варьирование коэффициента сопротивления, усилия преднатяжения и предельных значений перемещений. Для верификации модели проведены численные эксперименты на примере одноэтажного железобетонного каркаса (шаг рам 6 м, пролет 12 м) с использованием акселерограммы землетрясения вблизи о. Итуруп (8 баллов по шкале MSK-64). Представленные графики динамического отклика демонстрируют существенное

снижение амплитуд перемещений узлов по сравнению с базовой схемой. Выявлен эффект «модуляции размаха колебаний» при переходе демпфирующей связи в режим ограничителя. Установлено, что грамотный подбор параметров вязкоупругих элементов и системы преднатяжения позволяет эффективно снижать амплитуду колебаний каркаса без увеличения материалоемкости несущих конструкций.

***Ключевые слова*:** железобетонный каркас, математическая модель, численные эксперименты, вязкоупругие демпферы, демпфирование колебаний, гидроцилиндры одностороннего действия.

ADJUSTMENT OF PARAMETERS OF A VISCOELASTIC VIBRATION DAMPING SYSTEM FOR BUILDING STRUCTURES

***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, postgraduate student of the Department of Mechanics.*

Abstract

The article is devoted to improving the mechanical safety of reinforced concrete industrial frames under seismic, wind, and dynamic loads. As an alternative to traditional steel connections, which lose stability under alternating loads, an integral spatial damping system is proposed. It consists of three subsystems of cable connections with single-acting hydraulic cylinders, which provide vibration damping in the longitudinal, transverse, and vertical directions. A mathematical model of the frame dynamics has been developed and numerically implemented; it takes into account

the variation in the resistance coefficient, preload force, and limiting displacement values. To verify the model, numerical experiments were carried out using the example of a single-storey reinforced concrete frame (frame pitch 6 m, span 12 m) using an earthquake accelerogram near O. Iturup (8 points on the MSK-64 scale). The presented graphs of the dynamic response demonstrate a significant decrease in the amplitudes of node movements compared to the basic scheme. The effect of "modulation of the oscillation range" during the transition of the damping coupling to the limiter mode is revealed. It has been established that a competent selection of the parameters of viscoelastic elements and the pre-tensioning system makes it possible to effectively reduce the amplitude of frame oscillations without increasing the material consumption of the load-bearing structures.

Keywords: reinforced concrete frame, mathematical model, numerical experiments, viscoelastic dampers, vibration damping, single-acting hydraulic cylinders.

Введение

Поведение железобетонного каркаса при динамических нагрузках существенно отличается от статического режима работы, что нередко приводит к просчетам при проектировании. Внешние воздействия, такие как ветер, вибрации от транспорта, сейсмика или взрывные воздействия вызывают колебания, которые при резонансе могут многократно превышать расчетные показатели. Хотя внутреннее демпфирование способствует рассеиванию энергии, его естественного уровня часто оказывается недостаточно, из-за чего даже умеренные динамические нагрузки могут спровоцировать критические повреждения конструкции. В связи с этим требуется построение и развитие методов расчёта механической безопасности конструкций, рациональное

проектирование и оптимизация систем защиты, в том числе при чрезвычайных ситуациях и особых воздействиях.

Анализ современной инженерной практики показывает неэффективность экстенсивного подхода к сейсмозащите, основанного на простом наращивании сечений, прочности материалов или массы здания. Подобное утяжеление лишь меняет частоту собственных колебаний, не устраняя риск резонанса. Более того, избыточная жесткость каркаса зачастую провоцирует хрупкое разрушение узлов при импульсных нагрузках. В связи с этим акцент смещается с тотального упрочнения конструкций на методы управляемой диссипации энергии. Данное направление активно эволюционирует.

Для противодействия продольным нагрузкам в промышленных каркасах традиционно применяются вертикальные связи, выполненные в виде перекрестных стальных стержневых систем. Однако при знакопеременных сейсмических воздействиях стандартные стальные связи быстро теряют устойчивость при сжатии, что приводит к перераспределению усилий и разрыву растянутых элементов. Увеличение сечения связей не решает проблему, так как это может привести к разрушению узлов их крепления к колоннам.

В качестве альтернативы в данной работе предлагается интегральная пространственная система демпфирования, состоящая из трех подсистем тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Эти системы предназначены для гашения горизонтальных колебаний (в продольном и поперечном направлениях) и вертикальных колебаний несущих конструкций покрытия. В отличие от жестких связей, тросовые системы работают только на растяжение, а наличие обратных клапанов, возвратных пружин и системы преднатяжения позволяет им эффективно рассеивать энергию колебаний. В данной статье развивается тематика работ [1-4].

Конструкция железобетонных промышленных зданий представляет собой совокупность поперечных и продольных рам, конструкций покрытия (фермы или балки) и плит покрытия. Общий вид рассматриваемого железобетонного каркаса с обозначением основных несущих элементов представлен на рис. 1.

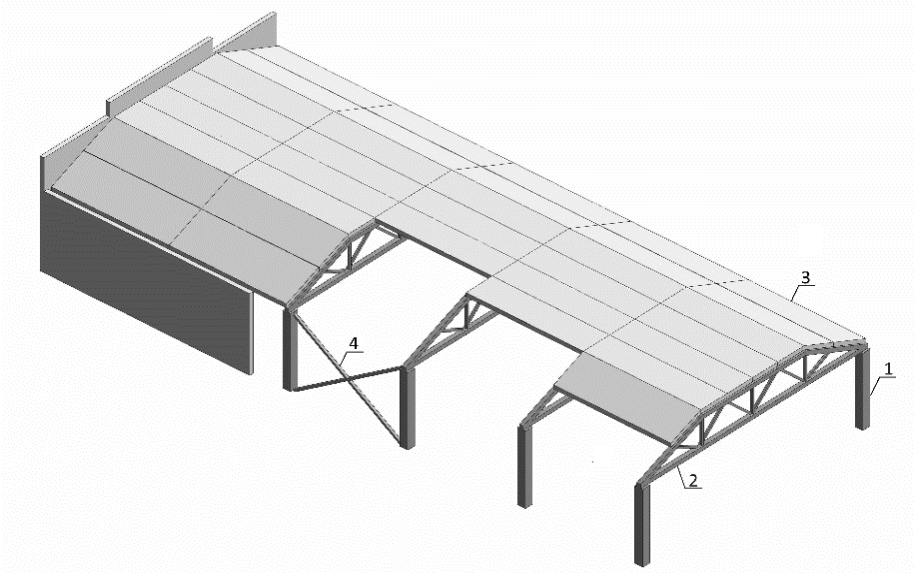


Рисунок 1 - Общий вид железобетонного каркаса:
1 – колонна; 2 –балка или ферма; 3 – плиты покрытия;
4 – стальные связи

1. Интегральная система пространственного демпфирования

Для обеспечения пространственной жесткости и защиты каркаса от разнонаправленных динамических воздействий предлагается интегральная система демпфирования, состоящая из трех функциональных подсистем. Эти подсистемы работают совместно, образуя единый комплекс гашения колебаний железобетонного каркаса.

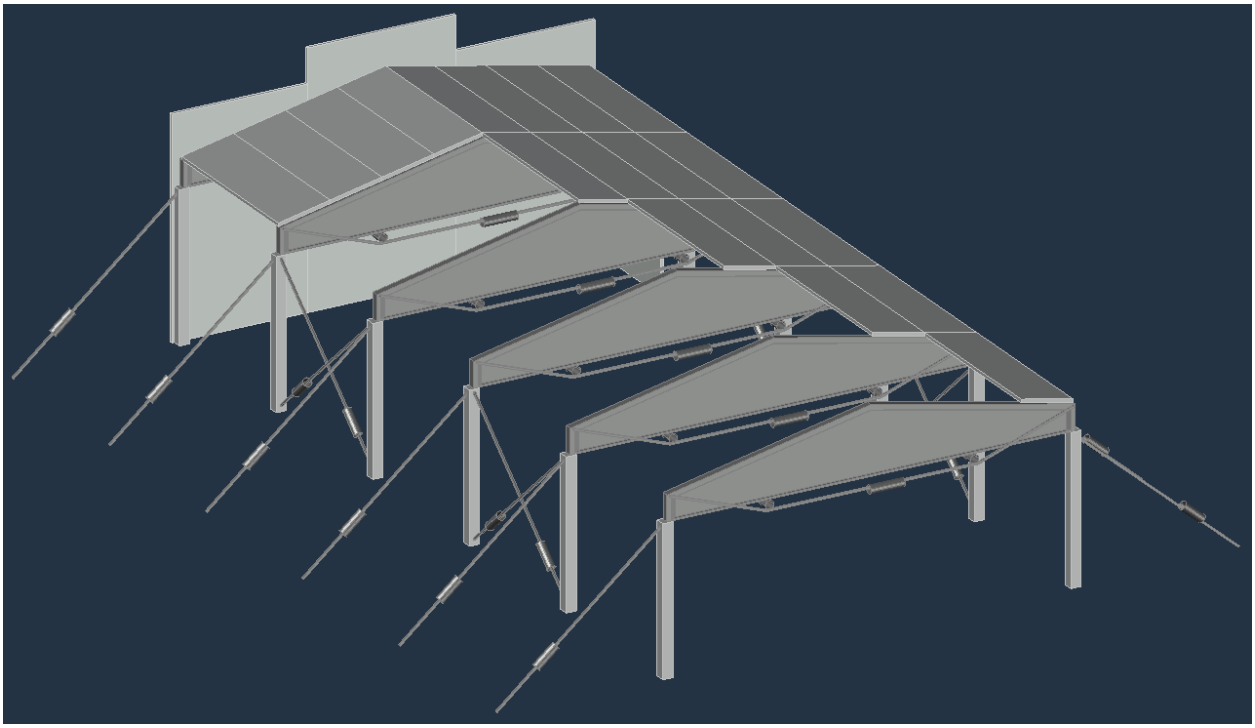


Рисунок 2 - Демпфирование ж.б. каркаса при помощи тросовой системы с гидроцилиндрами в поперечном, продольном и вертикальном направлениях.

Для восприятия инерционных сил, действующих вдоль цеха, и гашения продольных колебаний применяется перекрестная вертикальная ленточно-тросовая система связей с гидроцилиндрами одностороннего действия (рис. 2). В качестве несущих элементов используются стальные канаты, работающие на растяжение. При сейсмических воздействиях, когда волна распространяется вдоль здания, эти связи вступают в работу, предотвращая критические смещения каркаса.

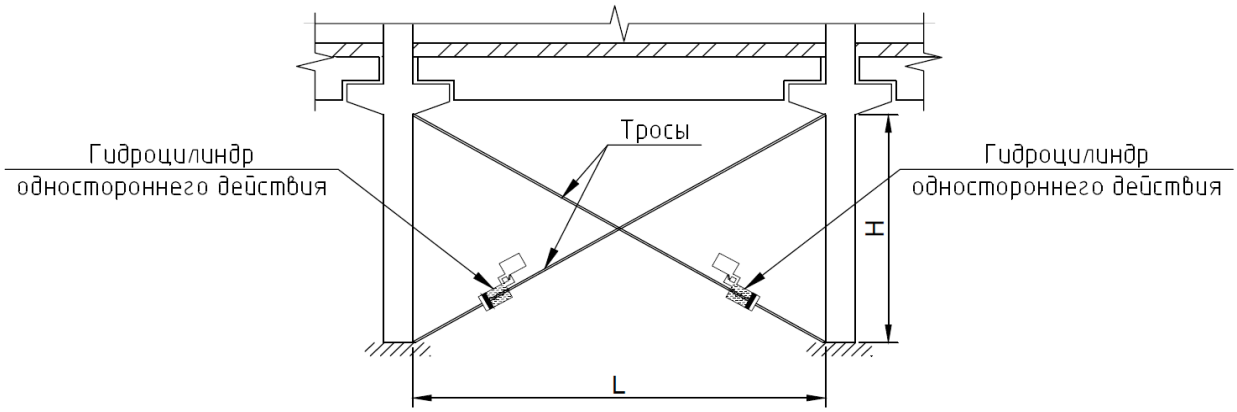


Рисунок 3 - Продольный разрез промышленного каркаса с перекрестной тросовой системой связей

Расчет каркаса в поперечном направлении (в плоскости балки или фермы) имеет свою специфику. Для защиты поперечных рам тросовые связи с гидроцилиндрами устанавливаются к колоннам плоской рамы (рис. 3). Эквивалентная жесткость колонн при этом подсчитывается исходя из совокупности колонн поперечного направления, вовлеченных в работу

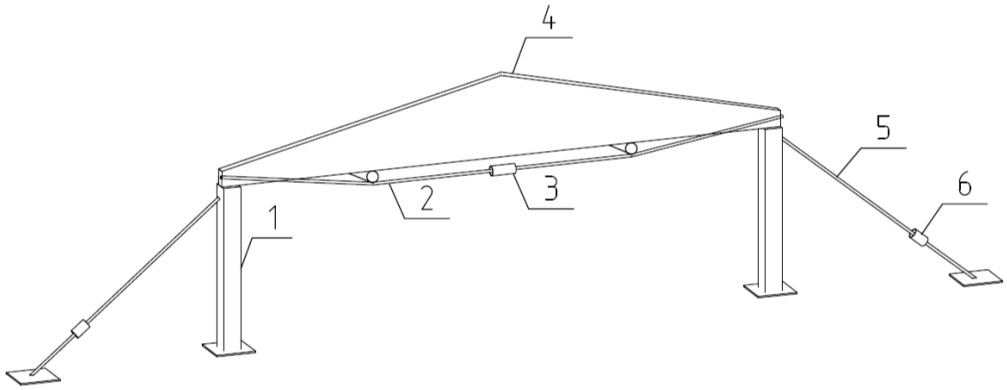


Рисунок 4 - Схема установки демпфирующих связей с гидроцилиндрами в поперечном направлении (1- колонна, 2 – трос, 3 – гидроцилиндр, 4- ж.б. балка, 5 – трос, 6 – гидроцилиндр)

Балочная система покрытия испытывает значительные деформации при возмущающих воздействиях от вертикальной составляющей акселерограммы переносного движения. Очевидно, что вертикальная составляющая оказывает влияние на каждую ферму (или балку) в отдельности. Для защиты от вертикальных сейсмических воздействий предлагается использовать дополнительные тросовые связи, оборудованные гидроцилиндрами одностороннего действия, устанавливаемые в плоскости фермы или балки (рис. 4).

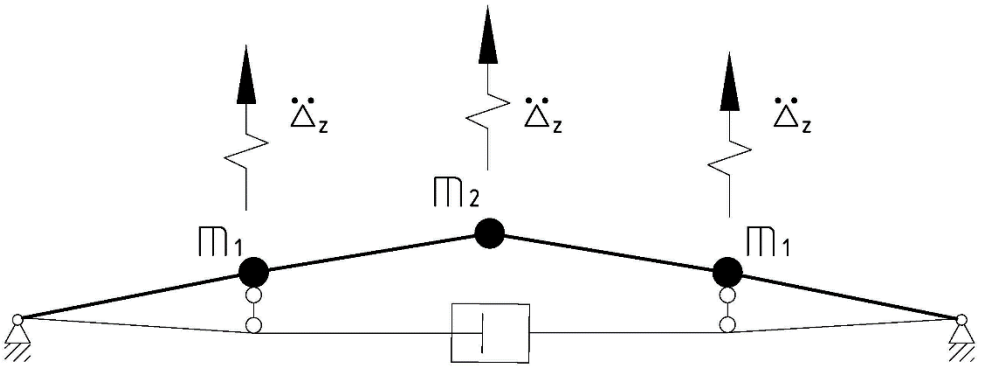


Рисунок 5 - Система вертикального демпфирования несущих конструкций покрытия

Ключевым элементом всех трех подсистем является тросовый гаситель с гидроцилиндром одностороннего действия (рис. 5). Устройство включает в себя стальной трос, гидроцилиндр с возвратной пружиной и систему клапанов, а также механизм преднатяжения. Такая конструкция позволяет рассеивать энергию колебаний только в одном направлении (на растяжение), а при обратном движении — работать в режиме холостого хода, не передавая на колонны сжимающих усилий.

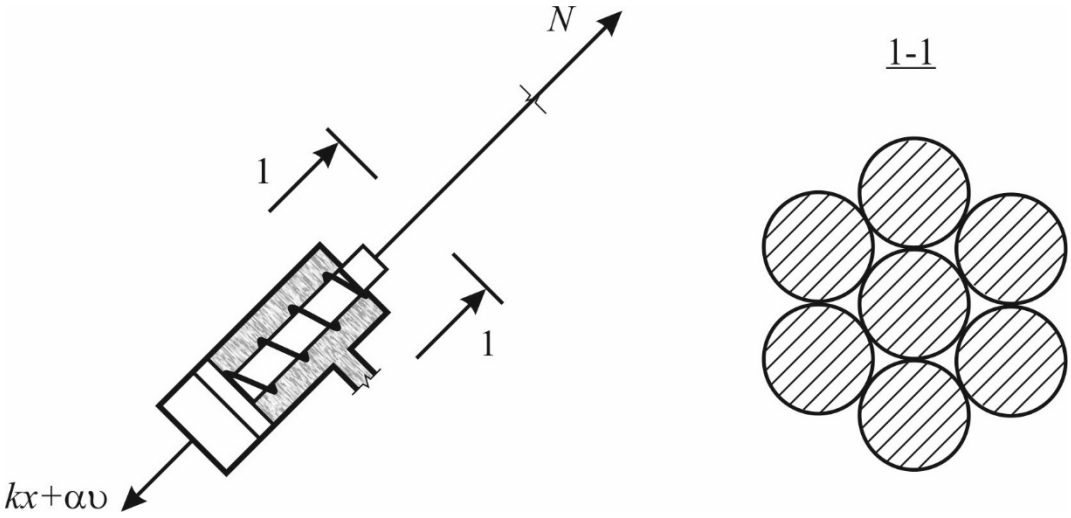


Рисунок 6 - Устройство тросового гасителя с гидроцилиндром одностороннего действия

2. Математическая модель динамики каркаса с демпфирующими связями

Рассматривается задача демпфирования колебаний пространственного железобетонного каркаса при помощи тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Построение математической модели данных систем связей приведено в работах [1-2].

Работа механической системы, включающей демпферы, описывается следующими соотношениями:

- работа с демпферами:

$$M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}-B(\acute{U})^{2}, \qquad 1.1$$

- холостой ход (механическая система без демпферов):

$$M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}, \qquad 1.2$$

- работа в режиме ограничителя:

$$M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}-K\text{тр}.U. \qquad 1.3$$

Здесь Kтр ─матрица жесткости стального троса.

Динамическая система с демпферами может работать в трех основных режимах:

1. Без преднатяжения тросов, работа демпферов только при отклонении от положения равновесия в одну сторону, в остальных фазах движения демпфер не работает:

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}-B(\dot{U})^2, \quad \{U\in R_1 \mid 0\le U\le +U\max, \dot{U}>0\}.$ 1.1a

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}, \quad \{U\in R_2 \mid U\max>U>U\min, \dot{U}<0\},$

   $\{U\in R_3 \mid U\min<U<0, \dot{U}>0\}.$ 1.2

2. С преднатяжением – на всем диапазоне движения в одном направлении демпфер работает, в противоположном движении – не работает:

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}-B(\dot{U})^2, \quad \{U\in R_4 \mid U\min\le U\le U\max, \dot{U}>0\}.$ 1.1b

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}, \quad \{U\in R_2 \mid +U\max>U>U\min, \dot{U}<0\}.$ 1.2

3. Работа с преднатяжителем и режимом ограничителя:

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}-B(\dot{U})^2, \quad \{U\in R_5 \mid [-Uextr]\le U\le [+Uextr], \dot{U}>0\}.$ 1.1c

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}, \quad \{U\in R_6 \mid [-Uetr]\le U\le [+Uetr], \dot{U}<0\}$ 1.2

   $M\ddot{U}+KU=P-M\ddot{\Delta}-K\text{тр}.U, \quad \{U\in R_7 \mid [-Uextr]>U, U>[+Uextr]\}.$ 1.3

   Здесь $[Uextr]$ - предельно допустимые значения узловых перемещений.

Для упрощения работы с нелинейными скоростями при переходе в прямой задаче динамики целесообразно представлять скорости левыми разностями.

$$\dot{U}_t = (U_t - U_{t-\Delta t})/\Delta t . \qquad (2)$$

Это облегчает решение прямой задачи динамики.

Предельно допустимое значение U_{extr} при включении в расчет уравнений 1.1c и/или 1.3 можно взять равным 1/75 *h.

Для верификации предложенного алгоритма и оценки эффективности системы демпфирования был проведен ряд численных экспериментов.

В качестве объекта исследования был выбран одноэтажный железобетонный промышленный каркас с шагом рам в продольном направлении 6м и пролетом 12 м. Колонны выбраны высотой 6м и сечением 400х400. Балки марки ЦБНД-12-1 выполнены из железобетона переменного сечения. Вертикальные связи выполнены из стального троса диаметром 41 мм по ГОСТ 7669-80. Разрывное усилие 110 т. Бетон колонн и балок В25. Рабочая арматура колонн класса А500, 4 стержня диаметром 25 мм. Балка запроектирована с арматурой класса А800, 4 стержня диаметром 20 мм.

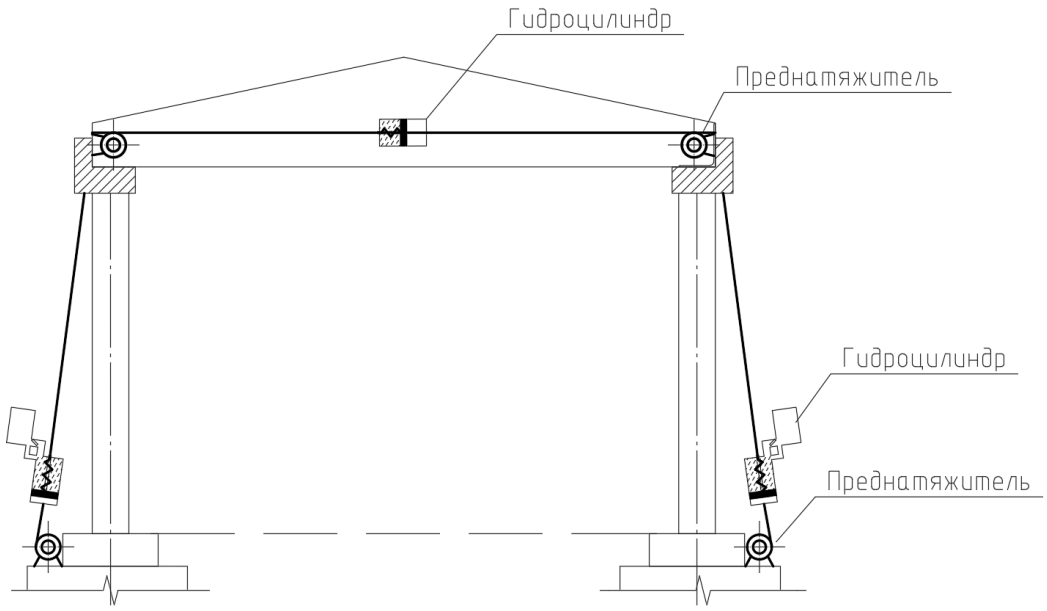


Рисунок 7 - Расчетная схема рамы с тросовой системой гашения колебаний на столбчатом фундаменте

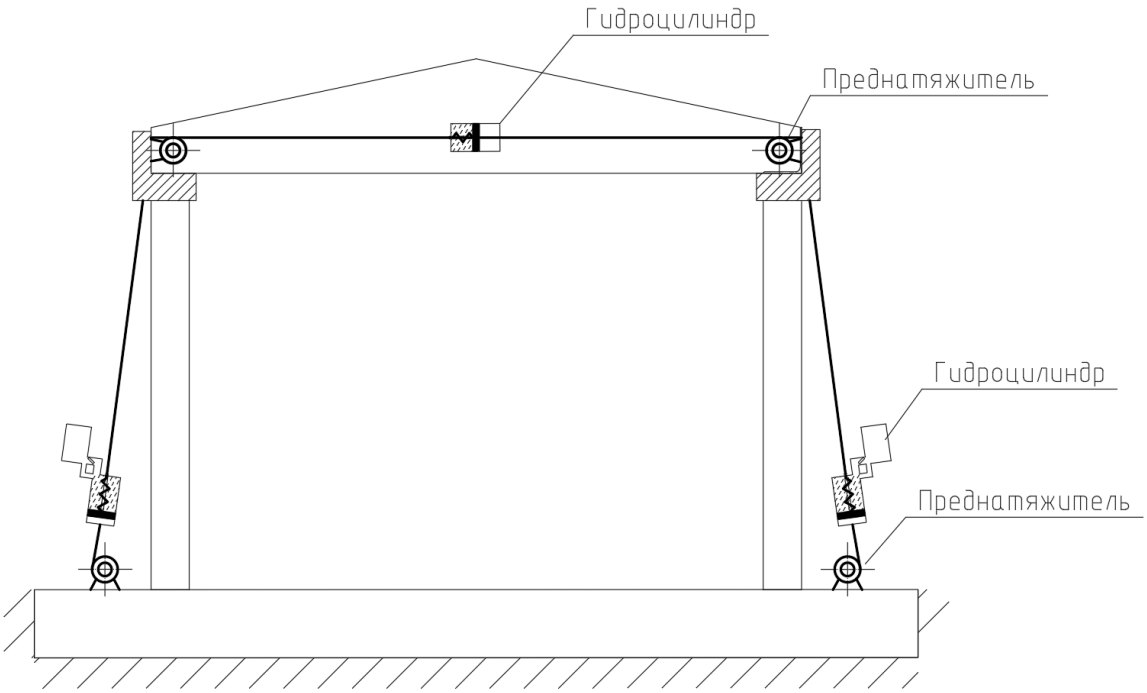


Рисунок 8 - Расчетная схема рамы с тросовой системой гашения колебаний на плитном фундаменте

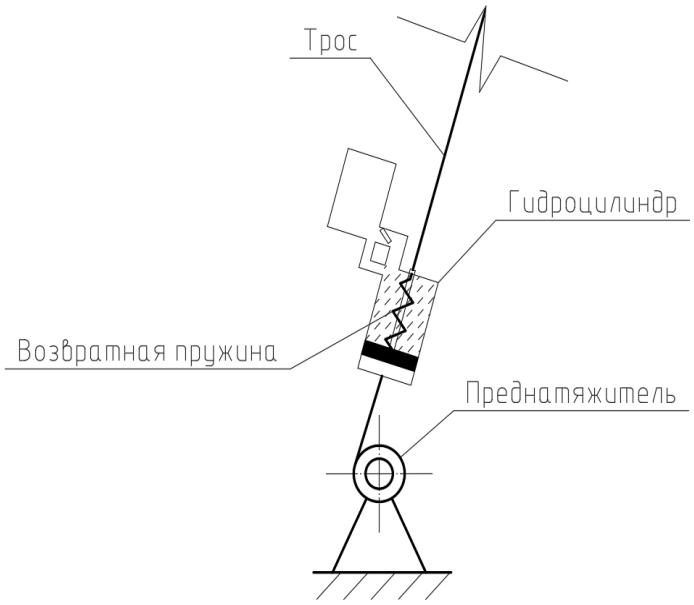


Рисунок 9 - Устройство тросового гасителя с гидроцилиндром одностороннего действия с преднатяжителем

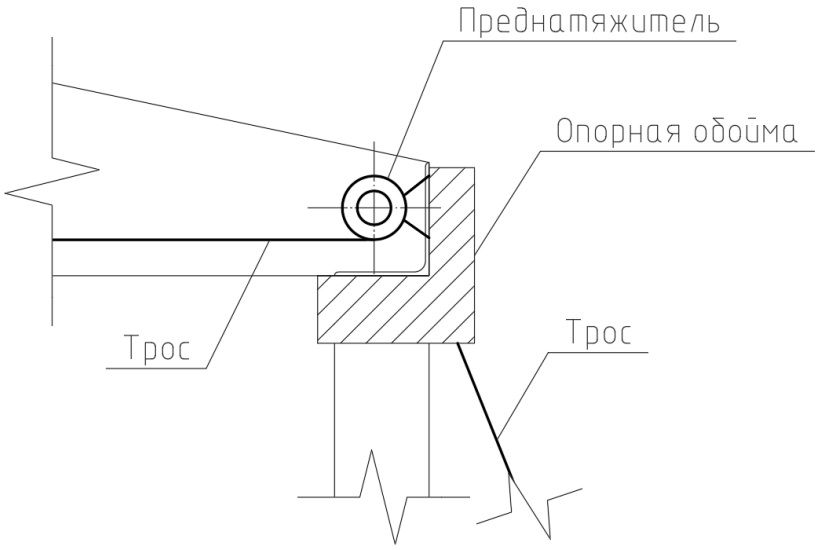


Рисунок 10 - Узел крепления тросовой системы гашения колебаний с гидроцилиндрами одностороннего действия

Расчет выполнялся по акселерограмме землетрясения произошедшего 25.05.2001 в близи острова Итуруп, оцененного в 8 баллов по шкале MSK-64.

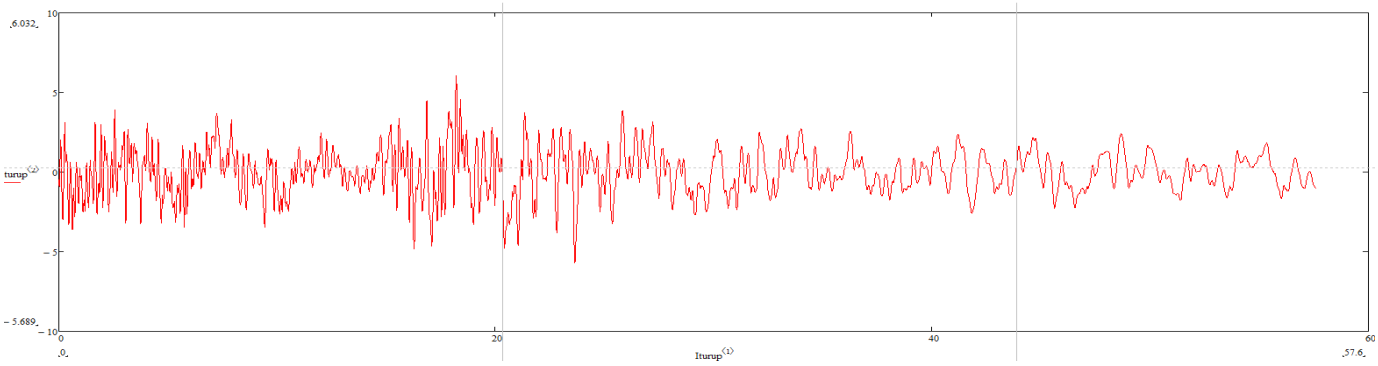


Рисунок 11 - Акселерограмма землетрясения

По результатам расчетов были получены следующие графики перемещений узлов системы, иллюстрирующие варианты работы демпфирующей системы в различных условиях:

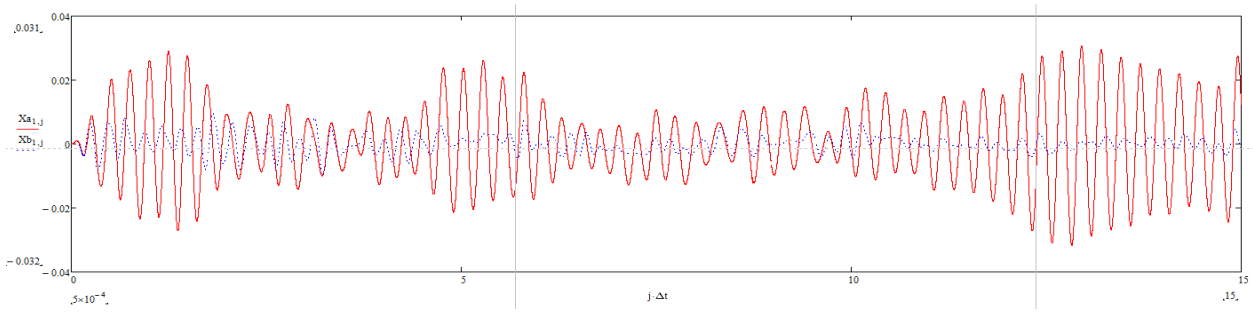


Рисунок 12 - Эффективность гашения колебаний при помощи тросовой системы с гидроцилиндрами: красная линия — исходный каркас без связей; синяя линия — каркас с гасителями колебаний.

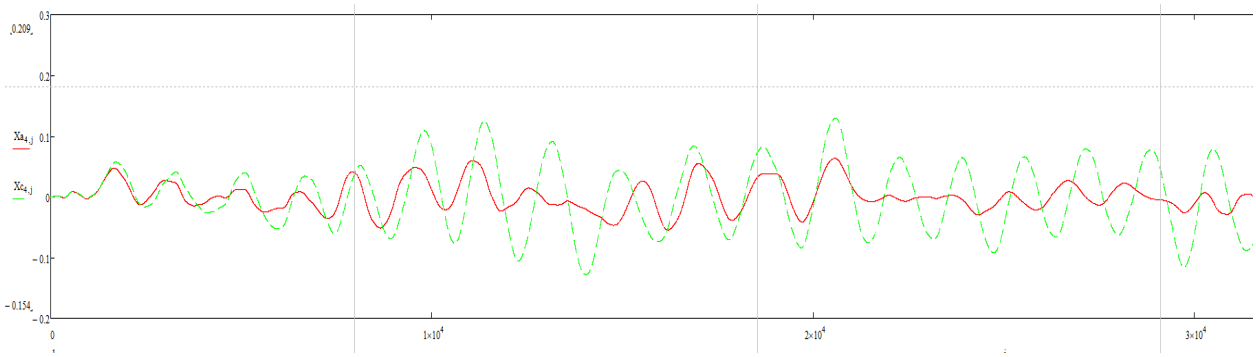


Рисунок 13 - Динамический отклик каркаса в поперечном направлении при резонансных явлениях: красная линия — постоянная работа гидроцилиндров; зеленая линия — свободная работа тросов с гидроцилиндрами.

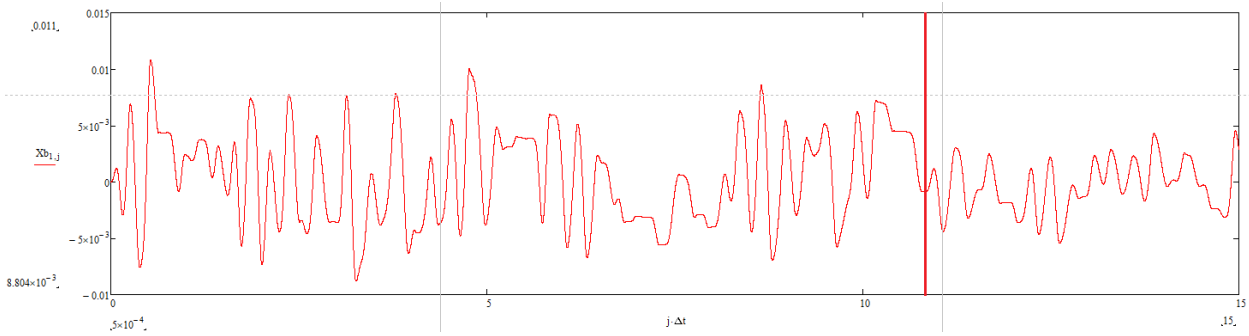


Рисунок 14 - График перемещений узла, иллюстрирующий эффект «модуляции размаха колебаний» при переходе демпфирующей связи в режим ограничителя. Одностороннее «срезание» пиков колебаний (работа троса как жесткой связи) при превышении заданного предельного перемещения Uext. Вертикальной линией показан момент входа системы в режим ограничителя.

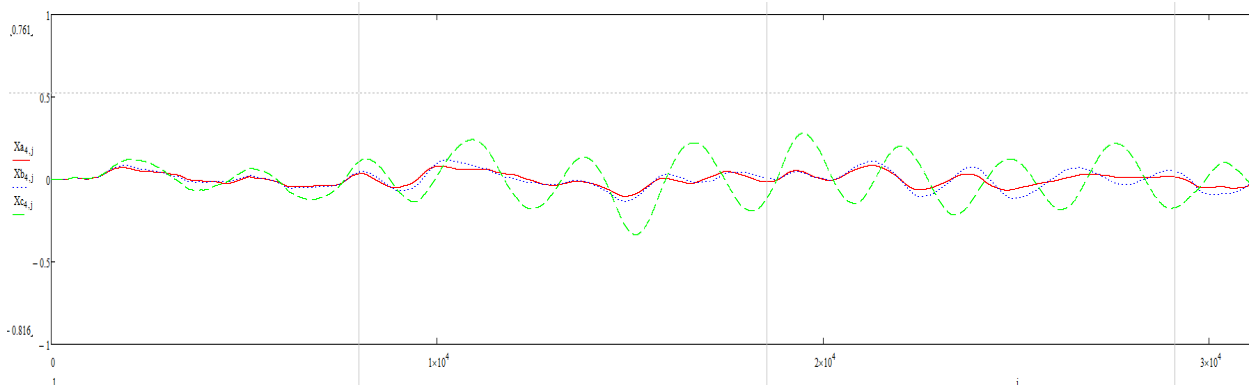


Рисунок 15 - Динамический отклик системы в виде перемещений узлов при варьировании коэффициентов демпфирования.

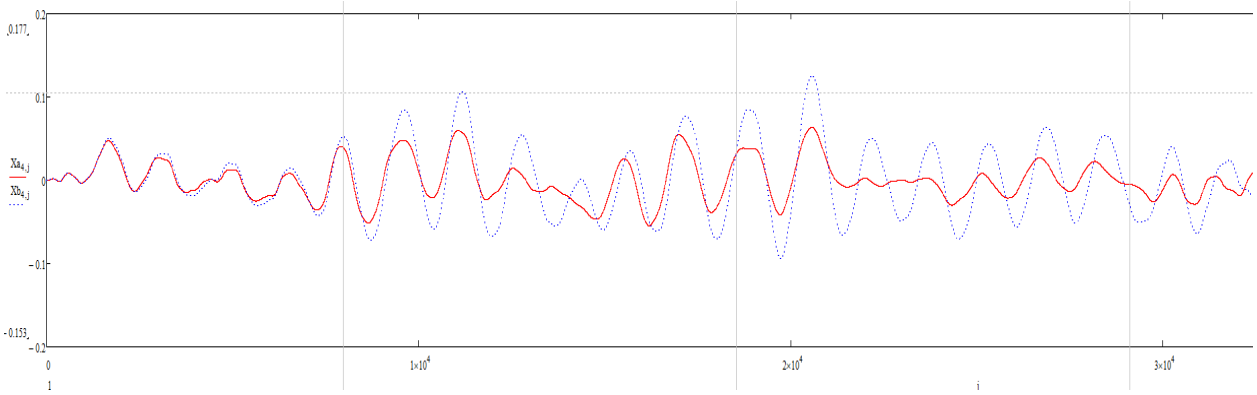


Рисунок 16 - Сравнение перемещений узлов при работе демпфирующих связей без преднатяжения (синяя линия) и с преднатяжением (красная линия).

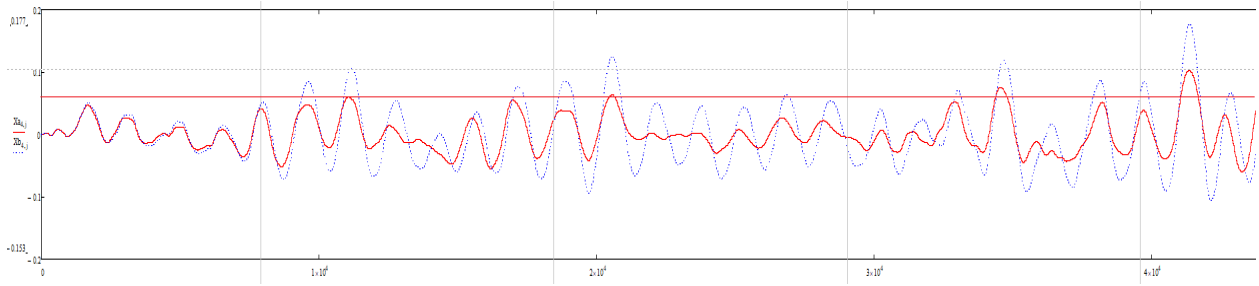


Рисунок 17 - Работа системы тросовых связей с гидроцилиндрами одностороннего действия в поперечном направлении: несимметричный «срез» пиков перемещений. Красной линией показан уровень заданного предельного перемещения. (Значения, выходящие за границу предельного перемещения, можно уменьшить, увеличив сечение тросов)

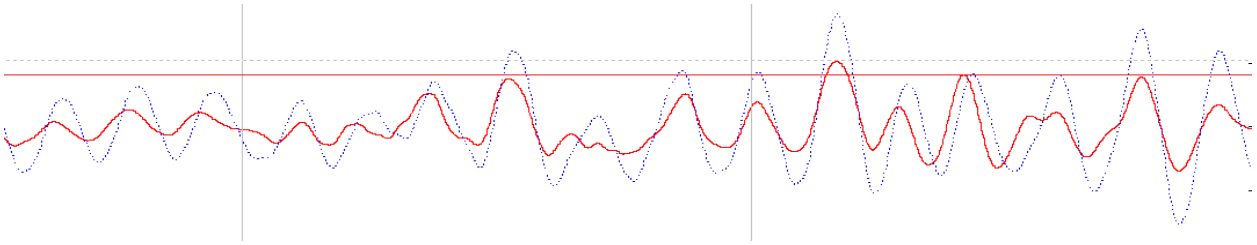


Рисунок 18 - График перехода тросовой связи с гидроцилиндром в режим ограничителя. Сглаживание пиков достигается увеличением сечения троса; *красной линией показан уровень ограничения*.

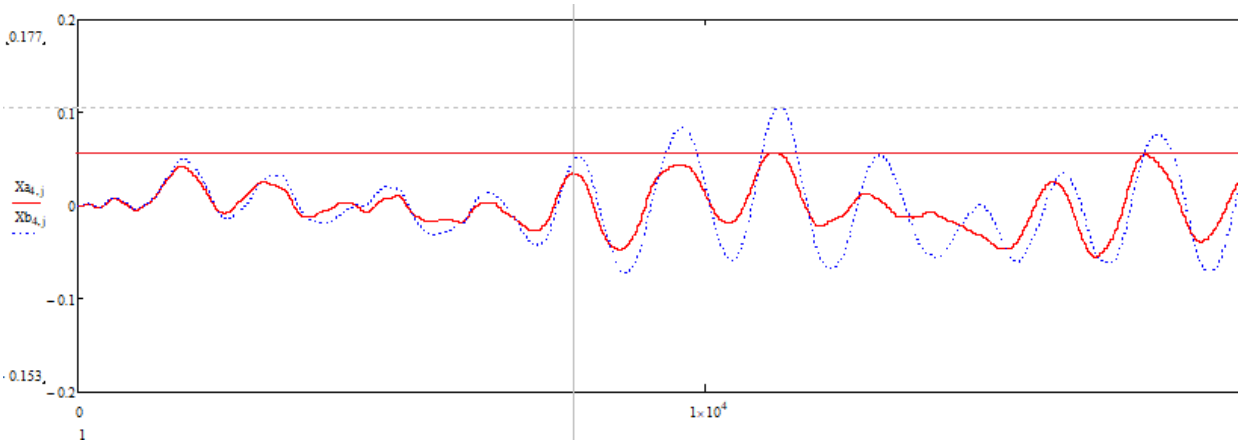


Рисунок 19 - График перемещений узла, демонстрирующий эффект срезания пиков перемещений *(красной линией показан уровень ограничения)*.

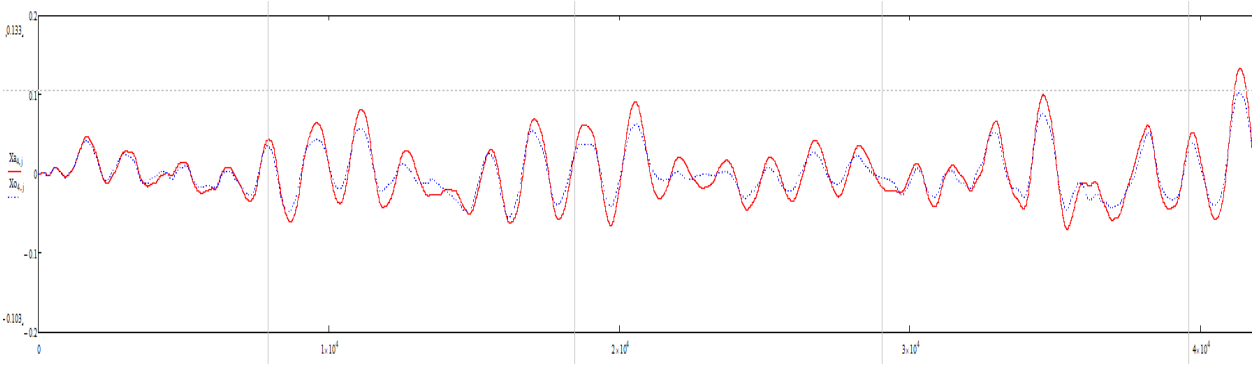


Рисунок 20 - Сравнение динамического отклика системы: снижение амплитуды перемещений при использовании оптимизированных параметров вязкоупругого демпфера (синяя линия) по сравнению с исходным каркасом (красная линия) при α= [9,5*10^5 Па*с].

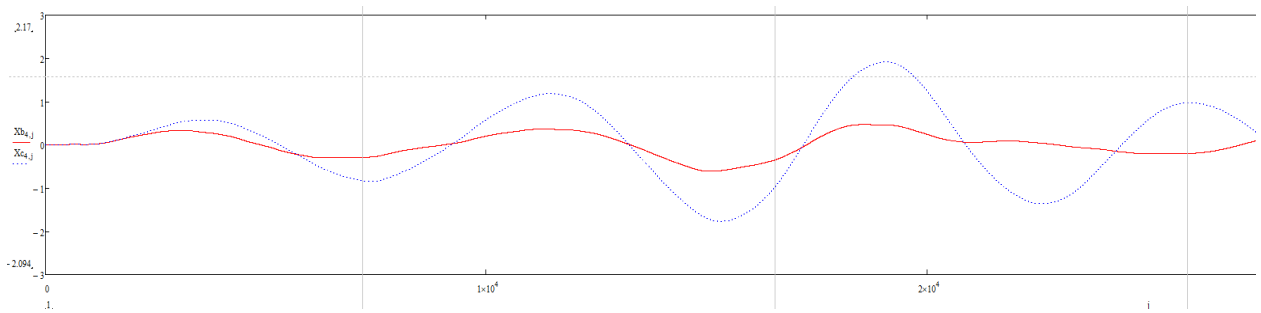


Рисунок 21 - Эффективность работы тросовых демпферов (красная линия) в сравнении с работой каркаса (синяя линия)

Выводы

1. Обоснована актуальность и предложена новая конструктивная схема. Показана неэффективность традиционных стальных связей, теряющих устойчивость при сжатии при знакопеременных сейсмических воздействиях. В качестве альтернативы предложена интегральная пространственная система демпфирования, состоящая из трех подсистем тросовых связей с гидроцилиндрами одностороннего действия, обеспечивающая защиту каркаса в продольном, поперечном и вертикальном направлениях.

2. Разработана математическая модель и алгоритм расчета. Построена математическая модель динамики системы «каркас – гаситель», учитывающая три режима работы (активная работа демпферов, холостой ход и режим ограничителя) и позволяющая варьировать коэффициент сопротивления, усилие преднатяжения и предельные значения перемещений. Для решения прямой задачи динамики реализован алгоритм с аппроксимацией нелинейных скоростей левыми конечными разностями.

3. Подтверждена высокая эффективность системы по результатам численных экспериментов. На примере одноэтажного железобетонного каркаса (шаг рам 6 м, пролет 12 м) при расчете по акселерограмме землетрясения у о. Итуруп (8 баллов по MSK-64) установлено, что включение в работу гидроцилиндров позволяет

существенно снизить амплитуды перемещений и ускорений узлов каркаса по сравнению с базовой схемой без гасителей.

4. Выявлен эффект «модуляции размаха колебаний». Показано, что при превышении заданных предельных перемещений демпфирующая связь переходит в режим жесткого ограничителя. Одностороннее «срезание» пиков колебаний позволяет гибко управлять динамической реакцией системы и предотвращать критические повреждения несущего каркаса без увеличения материалоемкости железобетонных конструкций.

5. Определены рациональные параметры демпфирования. Установлено, что использование преднатяжения тросовой системы обеспечивает непрерывность работы гидроцилиндров, а подбор оптимального коэффициента сопротивления и увеличение сечения тросов позволяет дополнительно снизить уровень колебаний и сгладить пиковые значения перемещений.

6. Определена практическая значимость. Предложенная интегральная система связей может быть использована при проектировании, реконструкции и усилении железобетонных промышленных каркасов в сейсмически опасных районах, а также при воздействии интенсивных ветровых и динамических нагрузок, что способствует повышению живучести, надежности и срока службы зданий и сооружений.

Библиографический список:

1. Шеин А.И., Быков А.Н. Перекрестные системы связей с гидроцилиндрами для защиты железобетонных промышленных каркасов// Региональная архитектура и строительство/ 2026, №2(67)/, С. 97-108.
2. Shein A. I., Chumanov A. V., Zemtsova O. G., and Bykov A. N. Determination of the Parameters of a Band-Rope Damper with a Torsion Bar or a Single-Acting Hydraulic Cylinder.//Springer nature.com. Seismic Instruments. 61, 391–395 (2025). https://doi.org/10.3103/S0747923925700513
3. 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
4. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures [Text]/ A. Shein, A. Chumanov, A Malkov, N. Laskov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065.
5. Воробьева К.В., Зайнулабидова Х.Р., Фрезе М.В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмостойкости зданий и сооружений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016, Том 40, № 1. doi.org/10.21822/2073-6185-2016-40-1-108-118
6. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Труфанова Е.В. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;42 (3):8-15. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-8-15