


На правах рукописи



КБЕЙЛИ ДЖААФАР

**РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ С УЧЕТОМ
ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ В ПРОЦЕССЕ КОЛЕБАНИЙ**

2.1.9. Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чернов Юрий Тихонович

Официальные оппоненты: **Кодыш Эмиль Нухимович**
доктор технических наук, профессор,
почётный член РААСН, акционерное
общество «Центральный научно-
исследовательский и проектно-
экспериментальный институт
промышленных зданий и сооружений –
ЦНИИПромзданий», отдел конструктивных
систем, главный научный сотрудник

Арутюнян Арон Маратович
кандидат физико-математических наук,
акционерное общество «Научно-
исследовательский центр «Строительство»,
сектор динамики сооружений лаборатории
надежности сооружений Центрального
научно-исследовательского института
строительных конструкций имени
В. А. Кучеренко, старший научный
сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Защита диссертации состоится «26» июня 2024 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, Зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сидоров Виталий Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Землетрясение – одно из наиболее опасных стихийных бедствий, последствия которого могут приводить к экологическим катастрофам, включая разрушение сооружений, подъездных путей, нарушение водоснабжения и электрического снабжения и, что самое главное, к значительным человеческим жертвам.

Предварительные расчёты и анализ последствий землетрясений и разработанные на их основе рекомендации во многих случаях позволяют избежать или уменьшить возможные тяжелые последствия.

Наряду с широко развивающимися численными методами, одним из наиболее широко распространённых остаётся спектральный (квазистатический) метод, который, по существу, принят в основных нормативных документах, в частности, в СП 14.13330.2018.

Основная цель диссертационной работы – оценить или уточнить основные параметры, которые могут иметь значительное влияние на величины сейсмических сил и, в частности, коэффициент K_1 (учитывающий неупругие деформации и коэффициент динамичности β).

В представленной работе методы и вычислительные алгоритмы разработаны на основе спектрального метода в сочетании с пошаговым методом по времени, что позволяет на каждом этапе уточнять изменение конструктивной схемы здания, вычислять коэффициент динамичности, и на конечном этапе – значения коэффициента K_1 .

В рамках общей темы, которая определена в названии работы, были рассмотрены дополнительные задачи, которые также соответствуют общей цели работы, а именно:

- оценка влияния горизонтально-вращательных колебаний фундамента (плоский случай) на величины сейсмических сил;
- уточнение частотных зон вблизи резонанса, в которых при изменении конструктивной схемы, связанном с выключением отдельных связей, могут значительно измениться частоты собственных колебаний и, как следствие, может произойти отстройка от резонанса.

Сказанное выше, по существу, и определяет актуальность настоящей диссертации.

Степень разработанности темы исследования.

Рассмотрены научных работ, посвященные вопросам методов сейсмического анализа и расчётов конструкций с линейными и нелинейными характеристиками, учитывающий изменение конструктивной схемы (снижение несущей способности или разрушение отдельных элементов при сейсмических воздействиях) как: Чернов Ю.Т., Солодников В.В., Мондрус В.Л., Волкова М. В., Пятецкий В.М., Александров Б.К., Савинов О.А., Корнев, Б.Г., Рабинович И.М., Бахвалов, Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. и в зарубежных научных литературах исследуемым вопросам посвящены публикации следующих авторов: V. Gioncu, F. Mazzolani, T. K. Datta, L. Karavasilis, T. Blakeborough, S.Martin, S.Stein, M.Wyssession, R. Joseph, A. Mwafy, M. Shahria, а также

проведен анализ отечественных нормативных документов, посвященных методов анализа и расчётов конструкций при сейсмических воздействиях.

Целью диссертационной работы

Является разработка методов расчета и исследование систем с конечным числом степеней свободы с линейными и нелинейными характеристиками с учетом изменений конструктивной схемы в процессе колебаний при кинематических (сейсмических) воздействиях.

Задачи диссертационной работы:

1- построить решения уравнений движения на каждом шаге по времени в соответствии со спектральным подходом (методом «нормальных форм») в виде разложения по формам собственных колебаний;

2- выполнить расчёт конструкций при сейсмических воздействиях с учетом изменений конструктивных схем сооружений в процессе деформирования, основанный на методе «нормальных форм» и представлении сейсмических сил в виде разложений по формам собственных колебаний;

3- разработать методы сейсмического анализа, учитывающие изменение (снижение) несущей способности или разрушение отдельных элементов до окончательной потери несущей способности сооружения;

4- оценить общий характер колебаний зданий, выявить изменения его динамических характеристик в процессе колебаний и уточнить значение коэффициента неупругой работы конструкций K_1 как отношение сейсмических сил на этапе, предшествующем разрушению, к сейсмическим силам на этапе, соответствующем концу упругой стадии;

5- рассчитать системы виброзащиты сооружений с конечным числом степеней свободы (КЧСС) с нелинейными характеристиками при произвольных кинематических воздействиях, используя зависимости, основанные на передаточных (ПФ) и импульсных переходных функциях (ИПФ) линейных систем;

6- разработать алгоритмы расчета систем виброзащиты, включающих элементы с нелинейными характеристиками, основанные на передаточных (ПФ) и импульсных переходных функциях (ИПФ) при произвольных кинематических воздействиях;

7- разработать алгоритмы расчета горизонтально-вращательных колебаний фундаментов (как массивных объектов) и оценить влияние этих колебаний на величины сейсмических сил.

Научная новизна:

* Разработан метод сейсмического анализа, учитывающий изменение конструктивной схемы (снижение несущей способности или разрушение отдельных элементов) на каждом шаге по времени в процессе колебаний на основе метода «нормальных форм».

* Разработан, основанный на использовании передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ), метод расчета систем виброзащиты сооружений с линейными и нелинейными характеристиками при произвольных кинематических

воздействиях, в том числе с учётом изменения конструктивной схемы при отключении или разрушении дополнительных связей в процессе колебаний.

* Разработан метод и алгоритм расчета плоских колебаний сооружений на сейсмические воздействия с учетом смещения фундамента, близкого к горизонтально-вращательным колебаниям, основанный на использовании передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ).

Теоретическая значимость работы

Уточнены и развиты методы аналитического расчета конструкций с линейными и нелинейными характеристиками при сейсмических воздействиях с учетом изменений конструктивных схем сооружений в процессе колебаний.

Практическая значимость работы

Зависимости и алгоритмы расчета, разработанные в работе, можно использовать в инженерной практике при определении расчетных значений сейсмических сил и характера их распределения, при оценке динамического поведения здания с учетом изменений конструктивной схемы в процессе колебаний на каждом шаге по времени для систем с линейными и нелинейными характеристиками при сейсмических воздействиях.

Методология и методы исследования:

В работе дан обзор и анализ современной научно-технической литературы, относящейся к расчёту конструкций с линейными и нелинейными характеристиками при сейсмических воздействиях с учетом изменений конструктивных схем сооружений в процессе деформирования, основанные на методе «нормальных форм» и методе с использованием ИПФ. При расчете использовались системы компьютерной математики МATHCAD.

Положения, выносимые на защиту

В соответствии с пунктами (1,2,3,4) паспорта специальности.

1. Разработанный алгоритм решения уравнений движения с использованием шагового метода по времени в соответствии со спектральным подходом (методом «нормальных форм»).

2. Результаты расчета конструкций с использованием шагового метода по времени, основанного на методе «нормальных форм», с учётом изменений конструктивных схем сооружений в процессе колебаний при сейсмических воздействиях.

3. Определены уточнены значения коэффициента K_1 и выполнено их сравнение со значениями, приведенными в нормах.

4. Разработаны алгоритмы расчета виброзащитных сооружений с КЧСС с нелинейными и линейными характеристиками при кинематических воздействиях, используя зависимости, основанные на ПФ и ИПФ.

5. Разработаны алгоритмы расчета горизонтально-вращательных колебаний фундаментов при вычислении сейсмических сил.

6. Результаты расчета величин сейсмических сил с учетом смещения фундамента, показавшие, что смещение фундамента в грунте может существенно влиять на значение сейсмических сил.

Степень достоверности результатов

В работе использовались строгие математические методы, основанные на методах динамики сооружений, теории колебаний и теории расчета виброзащитных систем.

Результаты расчетов по разработанным методам подтверждаются сравнением с эталонными примерами.

Личный вклад автора

1- в развитии метода расчёта конструкций при сейсмических воздействиях с учетом изменений конструктивных схем сооружений в процессе деформирования, основанного на методе «нормальных форм» и представлении расчетных формул для вычисления сейсмических сил в виде разложений по формам собственных колебаний;

2- в оценке динамического поведения здания, расчетных значений сейсмических сил и их распределения, определении точного значения коэффициента неупругой работы конструкций K_1 с учетом изменений конструктивных схем сооружений в процессе деформирования;

3- в выводе формул расчета систем виброзащиты сооружений с нелинейными характеристиками с конечным числом степеней свободы при произвольных кинематических воздействиях с использованием зависимостей, основанных на передаточных (ПФ) и импульсных переходных функциях (ИПФ);

4- в разработке алгоритма расчета системы, включающей элементы с нелинейными характеристиками при произвольных кинематических воздействиях;

5- в сравнении и анализе перемещений различных типов систем с нелинейными характеристиками при произвольных кинематических воздействиях;

6- в разработке алгоритма расчета горизонтально-вращательных колебаний фундаментов (рассматриваемых как массивные объекты) при вычислении сейсмических сил с учетом смещения фундамента.

Апробация работы

Отдельные результаты работы докладывались на научно-технической конференции:

- International Conference on Engineering Systems 2021 (ICES 2021), 28-30 April 2020, Moscow, Russia.

Публикации

Результаты выполненного исследования приведены в 5 публикациях, из них 1 статья опубликована в журнале, индексируемом в базах данных Scopus, и 3 в научных журналах, входящих в список ВАК.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 92 наименований и 1 приложения. Общий объём диссертации составляет 135 страниц, 84 рисунка и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность выполненных исследований.

В первой главе диссертации приведен обзор работ по сейсмическим воздействиям, оценкам последствий этих воздействий, основным принципам проектирования сейсмостойких зданий и систем их виброзащиты. Приводится вывод и основные зависимости методов расчета конструкций на кинематические (сейсмические) воздействия (линейный статический метод, нелинейный статический метод, нелинейный динамический метод, метод, основанный на передаточных (ПФ) и импульсных переходных функциях (ИПФ) линейных систем с конечным числом степеней свободы).

Основные положения методов расчета, принятые и разработанные в представленной научной работе, основаны на методе «нормальных форм» и методе, который условно определяется как метод передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ).

Вторая глава описывает метод расчета сооружений на сейсмические воздействия с учетом изменения конструктивной схемы (шаговый метод по времени), в котором решения представляются в виде разложения по собственным векторам линейных систем, как в методе «нормальных форм». Метод «нормальных форм» - один из наиболее общих аналитических методов расчета и исследования динамических систем с конечным числом степеней свободы.

Сейсмическая сила, действующая на массу m_j при колебаниях сооружения по r -й форме, определяется по следующей формуле:

$$S_{jr} = m_j \cdot Y_{jr} \cdot J_r \cdot \sum_{i=1}^n Y_{ir} \cdot m_i \quad (1)$$

$$J_r = P_r \int_0^t \ddot{\epsilon}_0(\tau) \cdot e^{\frac{-\gamma}{2} P_r \cdot (t-\tau)} \sin P_r(t-\tau) d\tau, \quad (2)$$

где J_r – импульсная переходная функция для r -ой формы

Расчет сооружений и анализ полученных результатов состоят из трех основных этапов:

На первом этапе вычисляются динамические характеристики сооружения (матрицы жесткости или податливости), собственные частоты и формы колебаний с помощью алгоритма, основанного на методе «нормальных форм» на каждом временном шаге.

На втором этапе производится расчет здания на воздействие сейсмических сил и определяются все внутренние усилия в элементах.

На третьем этапе для всех критических сечений определяется напряженно-деформированное состояние: зоны нелинейных деформаций или разрушений в элементах - на основе диаграмм взаимодействия (зависимость между продольной силой и

изгибающим моментом), которая позволяет отобразить сопротивление поперечного сечения в случае взаимодействия изгибающего момента и продольной силы. (рисунок 2) и диаграммы (зависимость между изгибающим моментом и кривизной), которые показывают изменения момента сопротивления сечения относительно к кривизне (рисунок 1) для каждого сечения.

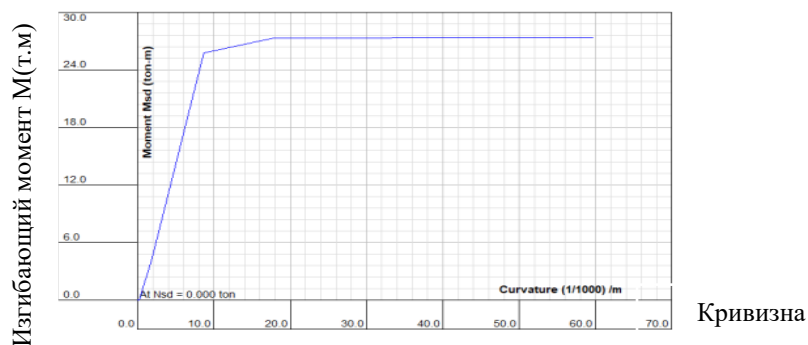


Рисунок. 1– Диаграмма (момент-кривизна)

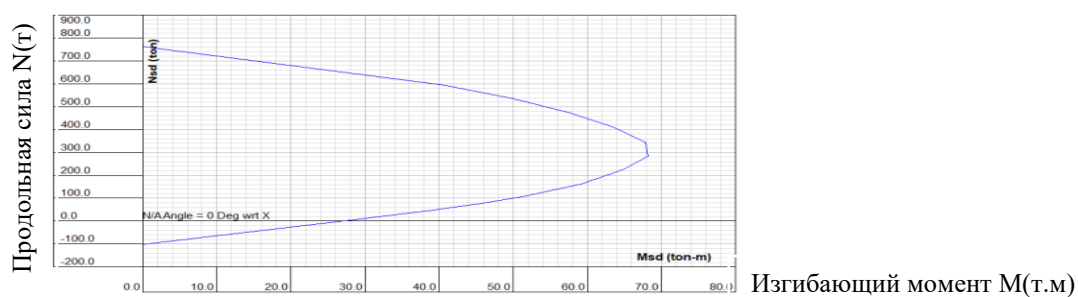


Рисунок. 2 – Диаграмма взаимодействия (продольная сила- изгибающий момент)

После этого определяется изменение конструктивной схемы, и расчеты проводятся по той же схеме, как на первом этапе, вплоть до разрушения здания.

Алгоритм расчета показан на рисунке 3.

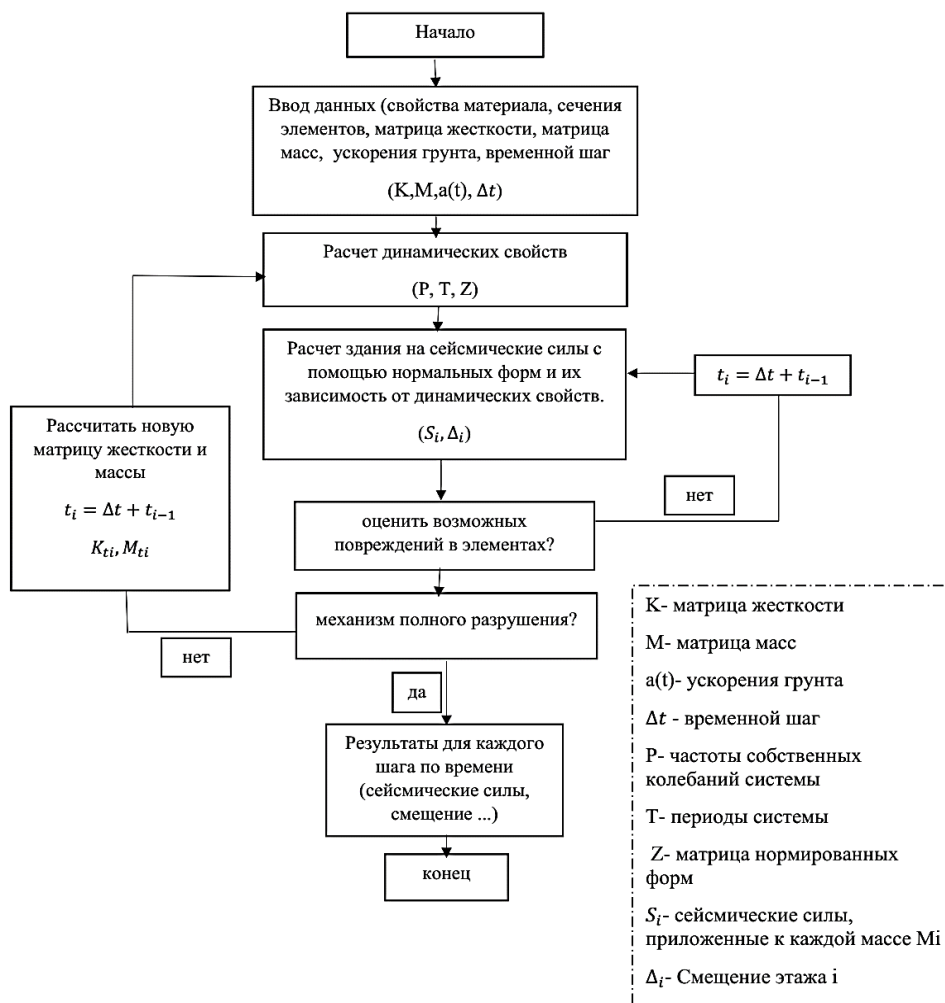


Рисунок. 3 – Алгоритм расчета

Для учета возможных повреждений и развития нелинейных деформаций в отдельных элементах некоторые международные нормы вводят дополнительные параметры при расчете на сейсмические нагрузки. В частности, в российских нормах используется коэффициент неупругой работы конструкции K_1 .

В представленной работе коэффициент K_1 определяется как отношение суммы сейсмических сил, соответствующих концу упругой стадии к сумме сейсмических сил, в момент, предшествующий разрушению конструкции:

$$K_1 = \frac{S_y}{S_u}, \quad (3)$$

где S_y - сумма сейсмических сил, соответствующих концу упругой стадии,

S_u - сумма сейсмических сил в момент, предшествующий разрушению конструкции.

В качестве примеров с помощью предлагаемого метода были рассчитаны: однопролетная конструкция с тремя степенями свободы (рисунки 4 и 5) и железобетонное пятиэтажное симметричное в плане здание (рисунки 6 и 7).

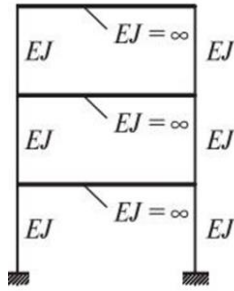


Рисунок 4 – Конструкция рамы



Рисунок 6 – План этажа здания

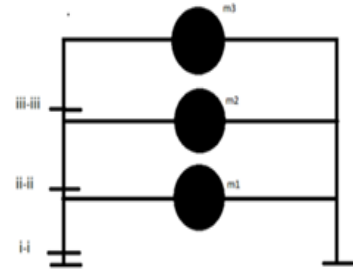


Рисунок 5 – Расчетная схема рамы

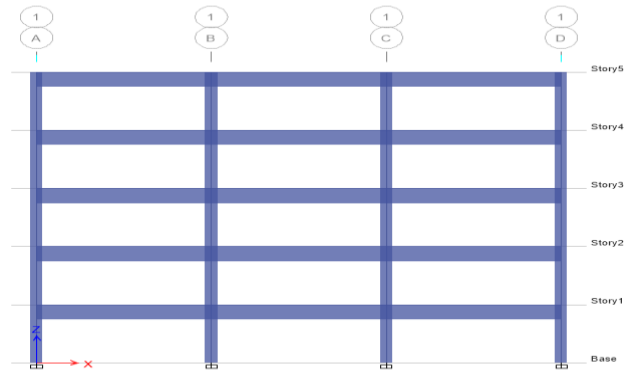


Рисунок 7 – Разрез здания

Результаты примеров расчета с использованием предложенного алгоритма показали, что такой подход позволяет оценить расчетные значения сейсмических сил с учетом изменения конструктивной схемы в процессе колебаний на каждом временном шаге. Изменение конструктивной схемы оценивается статическим расчетом на действие сейсмических сил, определенных на предыдущем этапе.

Уточненные значения коэффициента неупругой работы конструкций K_1 определяются как отношение сейсмических сил на этапе, предшествующем разрушению, к сейсмическим силам на этапе, соответствующем концу упругой стадии.

Предложенный метод позволяет более детально оценить реальную картину деформирования конструкций при сейсмических воздействиях с учетом использования реальных диаграмм движения грунта.

Третья глава содержит общие положения методов динамического расчета систем с конечным числом степеней свободы, основные на использование ПФ и ИПФ, а также, в качестве примера, методы и алгоритмы расчета некоторых систем виброзащиты сооружений при произвольных кинематических воздействиях.

Системы виброзащиты, в том числе с дополнительными выключающимися элементами являются одним из наиболее эффективных способов защиты сооружений от повреждений (разрушений) при кинематических и, главным образом, сейсмических воздействиях. При расчете линейных систем с относительно небольшим числом степеней свободы можно, используя зависимости, основанные на связи передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ), записать решения уравнений движения в замкнутом виде.

Алгоритмы расчета системы с одной двумя и тремя степенями свободы соответственно (ОСС, ДСС, ТСС), и методом передаточной и импульсной переходной функций при произвольных кинематических воздействиях приведены в работе.

При расчете нелинейных систем подобный подход позволяет построить решения с заданной заранее погрешностью в виде суммы двух интегралов Дюамеля. Метод расчета систем с конечным числом степеней свободы на динамические воздействия, в работе проиллюстрирован на примере системы двумя степенями свободы ДСС

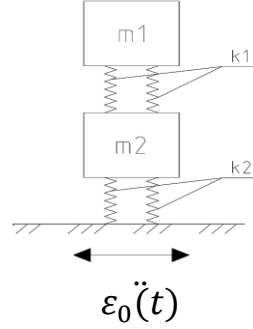


Рисунок. 8 Двухмассовая схема системы виброзащиты

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + \left(1 + 2v_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (y_1 - y_2) &= -m_1 E \ddot{\varepsilon}_0 \\ m_2 \ddot{y}_2 - \left(1 + 2v_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (y_1 - y_2) + \left(1 + 2v_2 \frac{d}{dt}\right) k_2 y_2 &= -m_2 E \ddot{\varepsilon}_0 + [c_2(y_2)] \end{aligned} \quad (4)$$

где m_i, k_i, v_i ($i = 1, 2$) – соответственно, характеристики масс, диссипации и жесткости системы, y_i ($i = 1, 2$) – перемещения масс системы.

Полагаем

$$y_{1(2)} = \bar{Y}_{1(2)} e^{i\omega t}, \quad \ddot{\varepsilon}_0 = \ddot{\varepsilon}_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

Подставим (5) в систему уравнений (4) и сократив на $e^{i\omega t}$, можем записать систему уравнений относительно амплитуд колебаний. При $E = 1$ эти функции соответствуют передаточным функциям

$$\begin{aligned} ((1 + i2n_1)k_1 - m_1 \cdot \omega^2) \bar{Y}_1 - (1 + i2n_1)k_2 \bar{Y}_2 &= m_1 \ddot{\varepsilon}_0 \\ -(1 + i2n_1)k_1 \bar{Y}_1 + ((1 + i2n_1)k_1 + (1 + i2n_2)k_2 - m_2 \cdot \omega^2) \bar{Y}_2 &= m_2 \ddot{\varepsilon}_0 \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) следует такие зависимости для передаточных функций в классическом виде. В работе это показано на примере передаточной функции \bar{H}_{11}

$$\bar{H}_{11} = \frac{k_1 + k_2 - m_2 \omega^2 + i2(n_1 k_1 + n_2 k_2)}{D_0 + i \cdot 2D_1} \approx \frac{k_1 + k_2 - m_2 \omega^2}{D_0 + i \cdot 2D_1} \quad (7)$$

Где \bar{H}_{ij} – комплексная амплитуда перемещений i -й массы при воздействии единичной силы $1 \cdot e^{i\omega t}$ на j -ю массу

$$\begin{aligned} D_0 &= m_1 m_2 \omega^4 - [m_1(k_1 + k_2) + m_2 k_1] \omega^2 + k_1 k_2 \\ D_1 &= (n_1 + n_2) k_1 k_2 - [n_1 k_1 (m_1 + m_2) + n_2 k_2 m_1] \end{aligned} \quad (8)$$

Частотное уравнение, полагая $\omega = p$ и приравняв $D_0(p)$ нулю запишем в виде

$$\begin{aligned}
& m_1 m_2 \left\{ p^4 - \left[\frac{k_1}{m_1} + \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1 m_2} \right) \right] p^2 \right\} + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \\
& = m_1 m_2 [p^4 - (h_1 + h_1 s_1 + 1)] p_{01}^2 p^2 + p_{01}^2 p_{02}^2 = 0
\end{aligned} \tag{9}$$

где:

$$h_1 = \frac{m_1}{m_2}; s_1 = \frac{k_2}{k_1}; p_{01}^2 = \frac{k_1}{m_1}; p_{02}^2 = \frac{k_2}{m_2}; \frac{p_{01}^2}{p_{02}^2} = h_1 s_1 \tag{10}$$

Вычислим корни уравнения (9) по формуле

$$p_{2(1)}^2 = \left[\frac{\varphi_1}{2} \mp \sqrt{\frac{\varphi_1^2}{4} - h_1 s_1} \right] p_{01}^2, \tag{11}$$

где $\varphi_1 = h_1 + h_1 s + 1$

Основная цель метода расчета системы с конечным числом степеней свободы с помощью передаточных и импульсных переходных функций, заключается в предоставлении этих функций в виде разложения по формам собственных колебаний системы.

После вычисления корней уравнения, следует также общая схема построения передаточных и импульсных переходных функций. Определитель системы и его производную по ω^2 записываем в виде (в частности, приведенном в работе Ю.Т. Чернова)

$$D(\omega) = m_2 m_1 (\omega^2 - p_1^2) (\omega^2 - p_2^2) \tag{12}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \omega^2} = m_2 m_1 [(\omega^2 - p_1^2) + (\omega^2 - p_2^2)] \tag{13}$$

Общий алгоритм вычисления ПФ и ИПФ показан на примере функции H_{11} (7) представлено в виде

$$H(\omega^2) = \frac{L(p_r)}{m_2 m_1 \prod_{r=1}^2 (\omega^2 - p_r^2)} \tag{14}$$

и воспользовавшись далее, традиционным преобразованием

$$H(\omega^2) = \frac{L(\omega^2)}{D(\omega^2)} = \frac{1}{m_2 m_1} \sum_{r=1}^2 \frac{K_r}{\omega^2 - p_r^2} \tag{15}$$

где коэффициент K_r следует вычислять по формуле

$$K_r = \frac{L(\omega^2)}{\frac{d}{d\omega^2} D(\omega^2 - p_r^2)} \tag{16}$$

Из (10)-(14) следует также зависимость для ПФ уже с учетом диссипативных сил

$$H_{11} = \frac{1}{m_2 m_1 (p_2^2 - p_1^2)} \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{L(p_r^2)}{p_r^2 - \omega^2 + i 2v_r \omega p_r^2} \tag{17}$$

где $L(p_r^2) = k_1 + k_2 - m_2 p_r^2$ (18)

Передаточная функция в виде (17), по существу, означает предоставление этих функций в виде разложения по собственным формам системы. Каждая составляющая этих функций является передаточной функцией системы с корнем уравнений p_r^2 и t .

Поскольку передаточные функции записаны в виде суммы передаточных функций систем типа систем с одной степени свободы, можно воспользоваться далее известными зависимостями между передаточными и импульсными переходными функциями для систем с одной степенью свободы, что позволяет записать следующее выражение для импульсных переходных функций

$$Ku_{11} = \frac{1}{m_2 m_1 (p_2^2 - p_1^2)} \sum_{s=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{k_1 + k_2 - m_2 p_r^2}{p_r^*} e^{-v_r \rho_r^2 t} \sin p_r^* t \quad (19)$$

где $p_r^* = p_r \left(1 - \frac{v_r^2}{4}\right)$.

Решение системы уравнений (4) в этом случае записывается в виде (20)

$$y_i(t) = \sum_{r=1}^n \int_0^t \varepsilon(\tau) Ku_r(t - \tau) d\tau \quad (20)$$

Линейная система (6), и соответственно полученные при её решении зависимости типа (14 - 19) могут определяться как «порождающие»

Используя полученные зависимости, записывается решение системы нелинейных уравнений, в которой, в частности, нелинейность связана с зависимостью $k_2 y_2 = C(y_2)$ (см ф. 14)

Это решение может быть также записано в виде разложения по формам собственных колебаний порождающей системы в виде двух составляющих типа интеграла Дюамеля.

$$\begin{aligned} y_i(t) &= y_{0i}(t) + w_{0i}(t) \\ y_{0i}(t) &= \int_0^t m_i \ddot{\varepsilon}_i(\tau) Ku_r(\rho_r, t - \tau) d\tau \\ w_{0i}(t) &= \int_0^t \left(1 + 2v_2 \frac{d}{dt}\right) [k_2 - c(y_2)] y_2 Ku_r(\rho_r, t - \tau) d\tau \\ &= \int_0^t \Phi_i(\tau) Ku_r(\rho_r, t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (21)$$

$i=1,2,$

Где $Ku_r(t)$ – импульсная переходная функция линейной системы;

$y_{0i}(t)$ – перемещение в линейной системе от внешней нагрузки;

$w_{0i}(t)$ – от фиктивной нагрузки, зависящей от вида нелинейной реакции системы.

Основным параметром, который определяет точность полученного решения является шаг по времени Δt . При малых значениях Δt может быть получено решения нелинейностей системы близкие к точными, то есть, с наперед заданной погрешностью. В этом случае решение нелинейности системы, в частности y_2 , должно записываться в таком виде

$$y_2(t) = y_{02}(t) + w_{02}(t)$$

где

$$y_{012}(t) = \int_0^t m_2 \varepsilon_0(\tau) Ku_{22}(\rho_r, t - \tau) d\tau + \int_0^t m_1 \varepsilon_0(\tau) Ku_{21}(\rho_r, t - \tau) d\tau; \quad (22)$$

$$w_{02}(t) = \int_0^t \Phi_2(\tau) Ku_{22}(\rho_r, t - \tau) d\tau.$$

В качестве примера рассмотрена одна из возможных систем виброзащиты— виброизолированная система с одной степенью свободы с динамическим гасителем колебаний для двух вариантов, в первом варианте динамическим гасителем является масса m_1 и в втором варианте динамическим гасителем является масса m_2 (рисунок.8)

В качестве внешнего воздействия (перемещение основания) принималась зависимость, характерная для машин с вращающимися частями на всех стадиях работы оборудования. (рисунок.9)

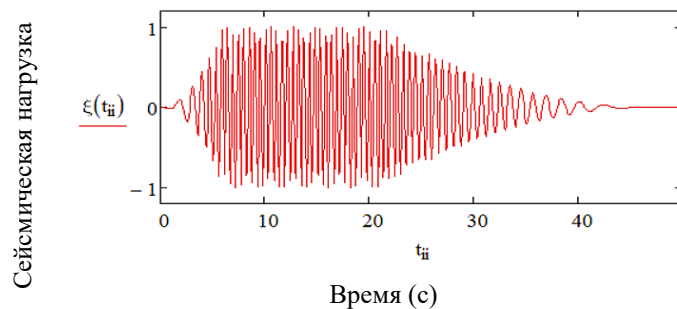


Рисунок 9 – Сейсмическая нагрузка

В результате были получены следующие значения перемещений в зависимости от схемы расположения гасителей колебаний в виде (рисунок.10, Таблица 1,2)

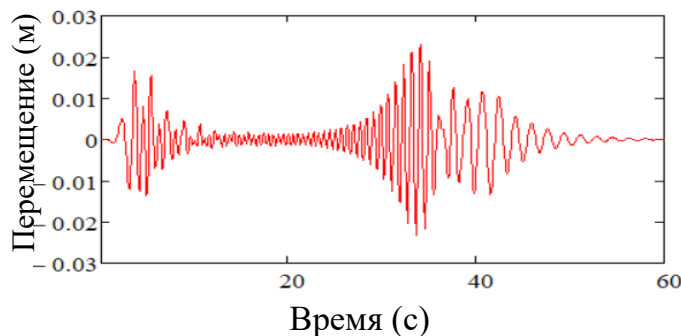


Рисунок 10 – Перемещения массы m_1

Таблица 1 – Результаты расчета (гасителем является система m_1)

При пуске		При остановке	
U_{\max} (м)	Увеличение Амплитуды массы m_1 в %	U_{\max} (м)	Увеличение Амплитуды массы m_1 в %
0,042	57%	0,067	50%

Таблица 2–Результаты расчета (гасителем является система m_2)

При пуске		При остановке	
Y_{\max} (М)	Уменьшение амплитуды массы m_1 в %	Y_{\max} (М)	Уменьшение амплитуды массы m_1 в %
0,018	64%	0,023	69%

Результаты показали, что в системе с динамическим гасителем (масса гасителя m_2 под массой m_1 , амплитуда перемещений снизилась на 69%, а во втором варианте, когда (масса гасителя m_1 над массой системы m_2), амплитуда перемещений увеличивалась на 50%.

В четвертой главе приведен метод расчета сооружений на сейсмические воздействия на основе спектральной теории с учетом смещения фундамента, близкого к горизонтально-вращательным колебаниям.

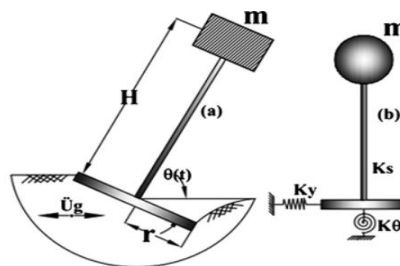


Рисунок. 11–Динамическая расчетная схема сооружения с учетом деформации между грунтом и фундаментом

Алгоритм расчета фундаментов построен, используя основные зависимости метода передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ), а также основные характеристики для несколько упрощенной модели, которая используется в нормативных документах – коэффициент постели при оценке упругих реакций и модифицированная модель Фойгта при учете диссипативных сил. (рисунок. 12).

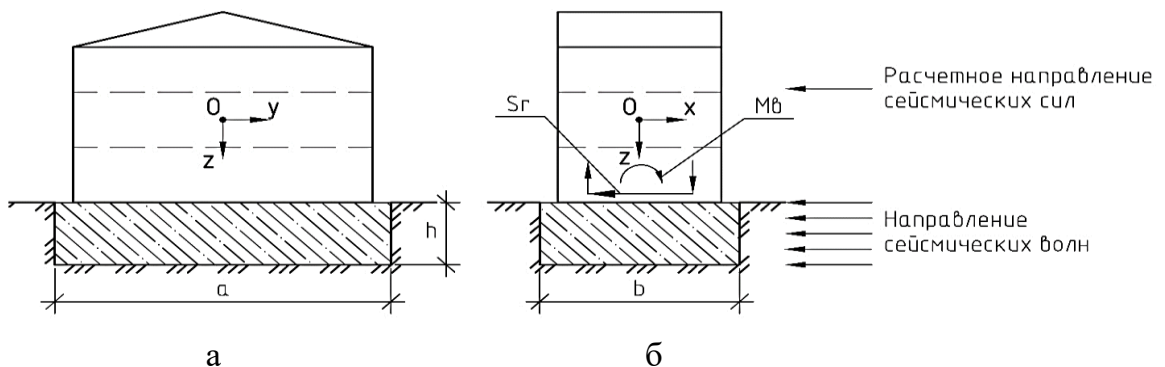


Рисунок 12– а. общая схема фасада; б. вид с торцевой части

Для зданий, у которых плоскость xOz является плоскостью симметрии и проходит через центр масс реакций отпора грунта под фундаментом, система трех уравнений плоских колебаний распадается на уравнение вертикальных и систему горизонтально-вращательных колебаний. Вычисленные по известной схеме передаточные (ПФ) и импульсные переходные функции (ИПФ) определяют принятый алгоритм расчета

$$m\rho_0^2\ddot{\vartheta} + K_\vartheta\vartheta - K_{xz}X = q_1(t) = M_1(t) = e^{i\omega t} \left(M_b + S_r \frac{h}{2} \right); \quad (23)$$

$$m\ddot{X} + K_x X - K_{xz}\vartheta = S_r e^{i\omega t},$$

где $\rho_0^2 = \frac{I_m}{m}$ – приведенный радиус инерции;

$I_m = \frac{m}{12}(b^2 + h^2)$ – момент инерции массы фундамента относительно оси Oy ;

m – масса фундамента;

K_ϑ, K_x, K_{xz} – коэффициенты, определяющие упругие свойства грунта в зависимости от величины коэффициентов постели ($C_z \frac{\tau}{M^3}$) и вида напряженного состояния:

– в основании: $C_z, C_x, C_{xy}, C_\varphi$ – соответственно для равномерного сжатия, равномерного сдвига, неравномерного сдвига, неравномерного сжатия;

– по боковым граням: $C_{x\delta}, C_{\varphi\delta}, C_{z\delta}$ – равномерного бокового сжатия, неравномерного сжатия, равномерного сдвига;

– по торцевым граням: $C_{xT}, C_{\psi T}, C_{y\varphi T}$ – равномерного сдвига, неравномерного сдвига, при повороте относительно оси Oy .

Равнодействующие силы от реакций грунта показаны на рис. 13. Формулы для вычисления реакций и моментов от них приведены ниже. Значения моментов во всех случаях зависят от величины и направлений действующих равнодействующих сил.

При единичном смещении центра масс:

– горизонтальные реакции в основании и моменты от этих реакций равны:

$$R_x = abC_x \quad (24)$$

$$M_{yx} = -\frac{abh}{2}C_x \quad (25)$$

– равнодействующая горизонтальных реакций по боковым граням и моменты:

$$R_{x\delta} = 2hbC_{x\delta} \quad (26)$$

$$M_{yx\delta} = -R_{x\delta} \frac{h}{2} = -h^2bC_{x\delta} \quad (27)$$

– равнодействующие реакции на торцах и моменты относительно оси y :

$$R_{xT} = 2haC_{xT} \quad (28)$$

$$M_{yxT} = -\frac{1}{8}(h_B^2 - h_H^2). \quad (29)$$

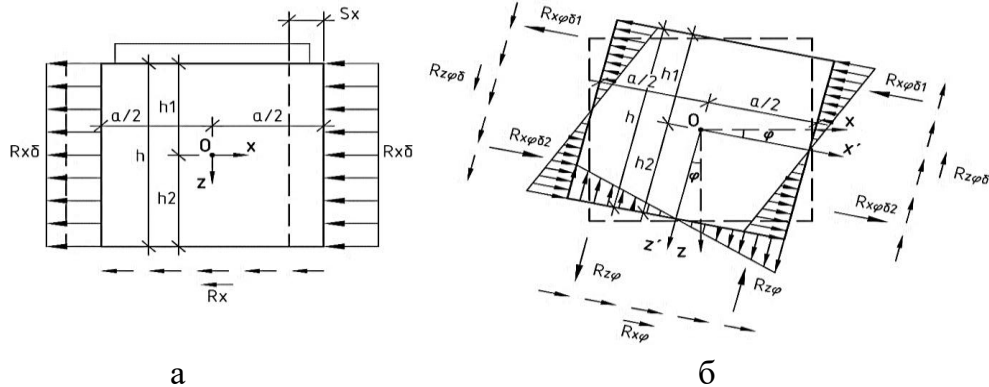


Рисунок. 13– Положительные направления реакций в системе: a – при горизонтальном смещении фундамента вправо; b – при повороте фундамента по часовой стрелке

При единичном повороте относительно оси Oy :

– вертикальные реакции в основании и моменты:

$$R_{z\varphi_1} = -R_{z\varphi_2} = \frac{a^2 b}{8} C_\varphi \quad (30)$$

$$M_{yz} = \frac{a^3 b}{12} C_\varphi; \quad (31)$$

– равнодействующие горизонтальных реакций в основании и моменты:

$$R_{x\varphi} = -\frac{ah_2 b}{2} C_{x\varphi} \quad (32)$$

$$M_{yx\varphi} = \frac{ah^2}{4} b C_{x\varphi} \quad (33)$$

– равнодействующие горизонтальных реакций по боковым граням и моменты:

$$R_{xyб} = R_{xyб_1} - R_{xyб_2} = \frac{1}{8} (h_1^2 - h_2^2) b C_{xб} \quad (34)$$

$$M_{x\varphiб} = \frac{h^3}{6} b C_{xб} \quad (35)$$

– суммарная вертикальная реакция по боковым граням и момент:

$$R_{z\varphiб_1} = bh \frac{a}{2} C_{zб} = 0 \quad (36)$$

$$M_{z\varphiб} = R_{z\varphiб_1} a = h \frac{a^2}{2} C_{zб} \quad (37)$$

Воспользовавшись зависимостями (20–24), запишем формулы для вычисления коэффициентов системы (23):

$$K_\vartheta = M_{yz} + M_{yx\varphi} + M_{xб\varphi} + M_{zб\varphi} + M_{y\tau\varphi}; \quad (38)$$

$$K_{xz} = M_{yx} \quad (39)$$

$$K_x = R_x + R_{xб} + R_{x\tau}. \quad (40)$$

Упругие постоянные удобно принять в долях от коэффициента C_z , например: $C_x = C_z$, $C_\varphi = 2C_z$, $C_{z\varphi} = 2,1C_z$, $C_{xб} = 0,7C_z$, $C_{x\varphi} = 0,8C_z$, $C_{zб} = 0,7C_z$, $C_{x\tau} = 0,6C_z$.

Вычислим коэффициенты по следующим формулам:

$$K_\vartheta = \frac{a^3 b}{12} + 0,7 \frac{ah^2}{4} b + 0,7 \frac{h^3 b}{6} + \frac{ha^2}{2} b + 2I_y \cdot 0,8C_z \quad (\text{м}^4); \quad (41)$$

$$K_{xz} = 0,8 \frac{ahb}{2} C_z \quad (\text{м}^3); \quad (42)$$

$$K_x = (ab + 2hb \cdot 0,7 + 2ha \cdot 0,6) C_z \quad (\text{м}^2). \quad (43)$$

Следуя общей схеме записи ПФ и ИПФ, полагаем в определителе системы $\omega^2 = p^2$. Приравнивая определитель к нулю, решаем частотное уравнение, корни которого

определяют частоты собственных колебаний системы. В свою очередь, вычисляем частоты собственных колебаний из уравнений (44):

$$p_2^4 - \left(\frac{K_x \rho^2}{m} + \frac{K_\vartheta}{m \rho_0^2} \right) p^2 + p_{\vartheta_0}^2 p_{x_0}^2 - \frac{K_{xz}}{m^2 \rho_0^2} = 0 \quad (44)$$

Где:

$$p_{\vartheta_0}^2 = \frac{K_\vartheta}{m \rho} = \frac{\frac{a^3 b}{12} + 0,7 \frac{a h^2}{4} b + 0,7 \frac{h^3 b}{6} + \frac{h a^2}{2} b + 2 I_y \cdot 0,8 C_z}{m \rho} \quad (45)$$

$$p_{x_0}^2 = \frac{K_x}{m} = \frac{(ab + 2hb \cdot 0,7 + 2ha \cdot 0,6) C_z}{m} \quad (46)$$

При построении передаточных функций уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} m \rho_x^2 \dot{\vartheta} + K_\vartheta \vartheta - K_{xz} X_1 &= M_c e^{i\omega t}; \\ m \dot{X}_1 + K_x X_1 - K_{xz} \vartheta &= S_r e^{i\omega t}. \end{aligned} \quad (47)$$

Подставив в (47) $\vartheta = \Theta e^{i\omega t}$; $x = X e^{i\omega t}$, после сокращения на $e^{i\omega t}$ получим уравнение форм для этого случая:

$$(K_\vartheta - m \rho^2 \omega^2) \Theta - K_{xz} X = M_{\text{сум}} \quad (48)$$

$$-K_{xz} \Theta + (K_x - m \omega^2) X = S_r. \quad (49)$$

Из решений системы уравнений (31-22) получаем формулы для передаточных функций в виде

$$H_{1x} = \frac{(K_\vartheta - m \rho^2 \omega^2) S_x + K_{xz} M_c}{D} = \frac{h_{rx} S_x + K_{xz} M_s}{D} \quad (50)$$

$$H_{1\vartheta} = \frac{(K_x - m \rho^2 \omega^2) M_c + K_{xz} S_x}{D} = \frac{h_{r\vartheta} M_c + K_{xz} S}{D} \quad (51)$$

где $h_{rx} = K_\vartheta - m \rho_0^2 \rho_r^2$, $h_{r\vartheta} = K_x - m \omega^2$

Частотное уравнение удобно записать в виде следующей системы уравнений:

$$D = m_0^2 \rho_y^2 \omega^2 - (K_\vartheta + \rho_y^2 K_x) m_0 \omega^2 + K_x K_\vartheta - K_{xz}^2 = 0$$

$$m_0^2 \rho_y^2 N(P) = m_0^2 \rho_y^2 [P^4 - (\rho_y^2 S_{x\vartheta} + 1) P_{o\vartheta}^2 P^2 + P_{ox}^2 P_{o\vartheta}^2 - P_{oxz}^4] = 0 \quad (52)$$

Где $S_{x\vartheta} = \frac{K_x}{K_\vartheta}$, $P_{o\vartheta}^2 = \frac{K_\vartheta}{m_0 \rho_y^2}$, $P_{ox}^2 = \frac{K_x}{m}$, $P_{oxz}^4 = \frac{K_{xz}^2}{m^2 \rho_0^2}$

Далее, следуя общей записи ПФ и ИПФ, определитель системы записываем в виде:

$$D(\omega) = m^2 \rho_y^2 (\omega^2 - P_1^2)(\omega^2 - P_2^2) \quad (53)$$

Где P_r - корни уравнения (52)

Вычисляем его производную по ω^2

$$\frac{dD(\omega)}{d\omega^2} = m\rho_y^2[(\omega^2 - P_1^2) + (\omega^2 - P_2^2)] \quad (54)$$

после чего можем представить передаточные функции в виде разложения по формам собственных колебаний:

$$\begin{aligned} H_x &= H_x^* e^{i\omega t} = \frac{1}{m^2 \rho_y^2 (P_1^2 - P_2^2)} \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{h_{rx} S_x + K_{xz} M_s}{P_r^2 - \omega^2 + i\gamma_r P_r^2} \\ &= N(P_r) \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{h_{rx} S_x + K_{xz} M_s}{P_r^2 A(P_r^2)} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (55)$$

$$H_\vartheta = H_\vartheta^* e^{i\omega t} = N(P_r) \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{h_{r\vartheta} M_c + K_{xz} S}{P_r^2 A(P_r^2)} \quad (56)$$

где:

$$N(P_r) = \frac{1}{m^2 \rho_y^2 (P_1^2 - P_2^2)}, \quad A = 1 - \frac{\omega^2}{P_r^2} + i\gamma_r \quad (57)$$

Воспользовавшись зависимостями, определяющими связь ПФ и ИПФ можем записать формулы для вычисления импульсных переходных функций:

$$K_{ихх}^* = N(P_r) S_x \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{h_{rx}}{P_r} e^{-\frac{\gamma_r}{2} P_r t} \sin P_r t \quad (58)$$

$$K_{их\vartheta}^* = N(P_r) S_x K_{xz} M_c \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{1}{P_r} e^{-\frac{\gamma_r}{2} P_r t} \sin P_r t \quad (59)$$

$$K_{и\vartheta\vartheta}^* = N(P_r) M_c \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{h_{r\vartheta}}{P_r} e^{-\frac{\gamma_r}{2} P_r t} \sin P_r t \quad (60)$$

Коэффициенты при $\cos \omega t$ можно вычислить, выделив действительную часть в зависимостях (59), (60). В частности:

$$X_1 = \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{L_x(r)(\omega^2 - p_r^2 + ip_r^2 \gamma_r)}{(p_r^2 - \omega^2) - \gamma_r^2 p_r^4} (\cos \omega t - i \sin \omega t), \quad (61)$$

где

$$L_x = \frac{1}{\Delta} \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} (K_\vartheta - m\rho_0^2 p_r^2) S_r + K_{xz} M_B \quad (62)$$

$$L_\vartheta = \frac{1}{\Delta} \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} (K_x - m p_r^2) M_B + K_{xz} S_r; \quad (63)$$

$$\Delta = m\rho_0^2 (p_2^2 - p_1^2) \quad (64)$$

В результате можем записать формулу для амплитуд при $\cos(\omega t + \varphi_r)$

$$X_1(t) = \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{L_x(p_r)}{(p_r^2 - \omega^2)^2 + \gamma_r^2 p_r^4} \cos(\omega t - \varphi_{x_r}) \quad (65)$$

$$\vartheta(t) = \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{L_\vartheta(p_r)}{(p_r^2 - \omega^2)^2 + \gamma_r^2 p_r^4} \cos(\omega t - \varphi_\vartheta) \quad (66)$$

где:

$$\operatorname{tg} \varphi_r = \frac{\gamma_r^2}{1 - \frac{\omega^2}{p^2}} \quad (67)$$

Влияние колебаний фундамента на значения сейсмических сил можно оценить, сопоставив значения амплитуд ускорений грунта с дополнительными амплитудами ускорений и сейсмических сил, определяемых с учетом горизонтально-вращательных колебаний фундамента. В частности, используя модифицированную гипотезу Фойгта и полагая $\gamma^2=0,2$, значение угла сдвига можно оценить по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi_{x_r} = \frac{\gamma_r^2}{1 - \frac{\omega^2}{p^2}} \approx \operatorname{tg} \varphi_{\vartheta_r}; \quad (68)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{x_r} = \operatorname{tg} \varphi_{\vartheta_r}$$

В качестве примера приведены результаты расчета семиэтажного здания с железобетонным каркасом, показанного на рисунке 14.

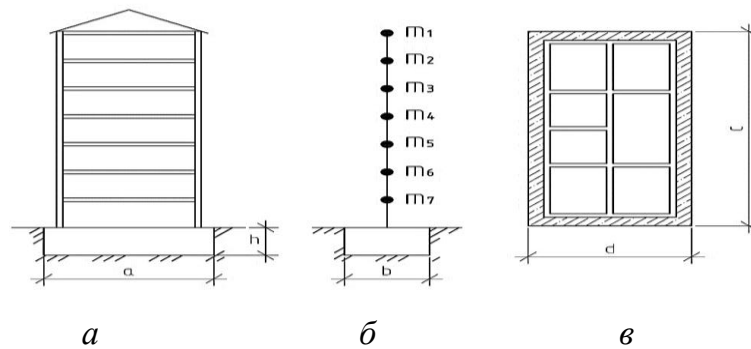


Рисунок. 14—Вертикальный и горизонтальный разрезы (а, в); расчетная схема (б)
Результаты расчетов занесены в таблицу 3

Таблица 3—Сейсмические силы и моменты, возбуждаемые при горизонтально-вращательных колебаниях фундамента, и их сравнение с начальными величинами

Начальные значения	При горизонтальном смещении центра масс	При угловых ускорениях	Отношение дополнительных сейсмических сил и моментов к начальным, %

сейсмичес ких сил, (кН)	момента в, (кН·м)	ускор ения, м/с ²	сейсмиче ские силы, (кН)	момент ы, (кН·м)	ускорен ия, (рад/с) ²	сейсмиче ские силы, (кН)	моме нты, (кН· м)	сейсмиче ские силы	момен ты
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Первый вариант									
518	8220	0,05	25,9	575	0,07	57,45	813	16	16,8
Второй вариант									
8094	128400	0,916	7414	1432	1,115	9024	1431 0	101	112

Результаты расчета показывают, что:

1- Жесткость надфундаментной конструкции существенно влияет на величину сейсмических сил и моментов, связанных с горизонтально-вращательными колебаниями фундамента. При увеличении первой собственной частоты здания с 2,4 до 7,1 Гц суммарные значения сейсмических сил возрастают в 2 раза, что, в свою очередь, приводит к увеличению магнитуды.

2. Уточнение результатов расчета реальных зданий связано:

– с учетом сдвига фаз между величинами сейсмических сил и перемещениями фундамента;

– уточнением величин суммарных сейсмических сил и характера их изменений во времени.

3. Ввиду условности задания упругих характеристик грунта количественные результаты, полученные в работе, следует рассматривать как качественные и достаточно приближительные. Хотя полученные соотношения, на наш взгляд, представляют особый интерес при проектировании сейсмостойких зданий.

В пятой главе по материалам второй и третьей глав рассчитано несколько примеров.

Первый пример (Расчет сооружения на сейсмические воздействия с учетом при изменении конструктивной схемы (временной шаговый метод и метод Pushover)

Результаты примера заключается в сравнении двух методов (предложенным методом в работы и методом Pushover) при определении значения коэффициента k_1 , а также с значениями k_1 которые приняты в наших нормах.

Метод pushover считается нелинейным статическим методом, который используется для точной и подробной оценки нелинейного поведения конструкций при возрастающих сейсмических нагрузках.

Рассматриваемое 3-х этажное железобетонное здание (рисунок. 15, 16) симметричное в плане с высотой этажа 3,5 м. Свойства и характеристики материалов и конструктивных элементов использованы в соответствии с нормами РФ.

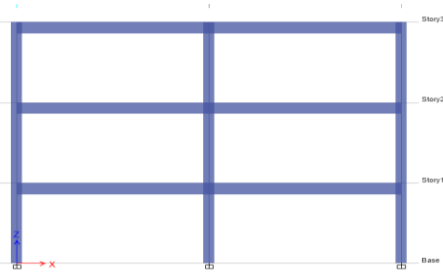


Рисунок. 15– Железобетонный каркас



Рисунок. 16– Расчетная динамическая схема здания

Ускорение принято в виде: (рисунок. 17)

$$a(t) = A_1 \sin(\omega_1 \cdot t) + A_2 \sin(\omega_2 \cdot t) \quad (69)$$

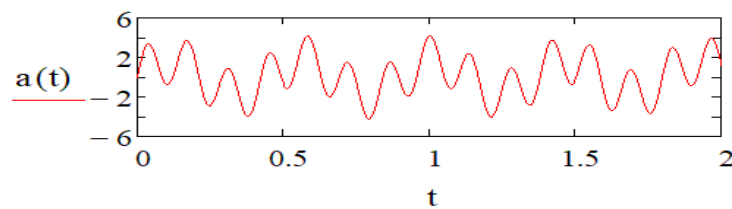


Рисунок 17– Ускорение земли

При анализе с помощью метода Pushover были определены свойства зон пластичности в соответствии с нормативным документом (ASCI 41-17), а также сейсмические силы и их распределение до разрушения здания.

Таблица 4– Результаты анализа

Шаг	Время t_i (с)	Сейсмические силы, приложенные к каждой массе M_i , (тс)			Поперечная сила в основании S , (тс)	Перемещение верха сооружения Δ_{top} , (мм)	Количество появившихся пластических шарниров	Место появления пластических шарниров
		S1	S2	S3				
0	0	0	0	0	0			
5	0,004	0,13	0,14	0,15	0,42	0,0004	Стадия упругая работы конструкции	
10	0,008	0,43	0,53	0,64	1,6	0,0017		
15	0,012	0,79	1,14	1,32	3,25	0,0034		
20	0,016	2,03	2,45	2,21	6,69	0,0066		
24	0,019	3,9	4,2	3,2	11,3	0,0106		
25	0,02	4,5	4,7	3,5	12,7	0,0118	3	1-й этаж
29	0,0235	5,93	6,22	5,16	17,3	0,0218	1	1-й этаж
30	0,0289	5,94	6,233	5,175	17,348	0,029	5	1-й и 2-й этажи
					17,348	0,219		разрушение

Изменения периодов колебаний здания по времени на каждом временном шаге, представлены в таблице 5

Таблица 5–Периоды форм колебаний

Шаг	t (с)	Период i -ой формы T (с)		
		T_1	T_2	T_3
1-24	0,0192	0,453	0,138	0,08
25-29	0,0235	0,692	0,173	0,087
30	0,0289	0,831	0,185	0,087

Результаты анализа методом pushover представлены в таблице 6.

Таблица 6–Результаты анализа Pushover

Шаг	Перемещение верха сооружения Δ_{top} , (м)	Поперечная сила в основании S , (тс)	
0	0	0	Стадия упругая работы конструкции
1	0,003972	4,1520	
2	0,018491	12,7698	
3	0,020298	13,4667	Стадия неупругая работы конструкции
4	0,027508	14,4702	
5	0,061034	17,2423	
6	0,141968	21,1552	
7	0,188273	23,3101	
8	0,193609	23,5512	

Механизм разрушения определялся обоими методами, а расположение пластических шарниров определялось, как показано ниже. (рисунок. 18, 19)

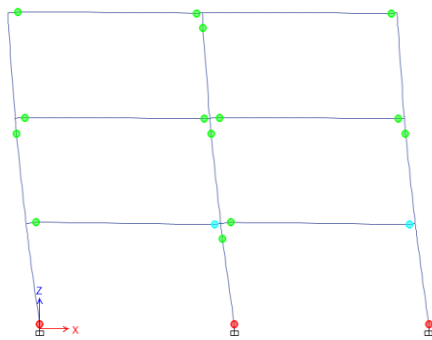


Рисунок 18– Механизм коллапса
(метод pushover)

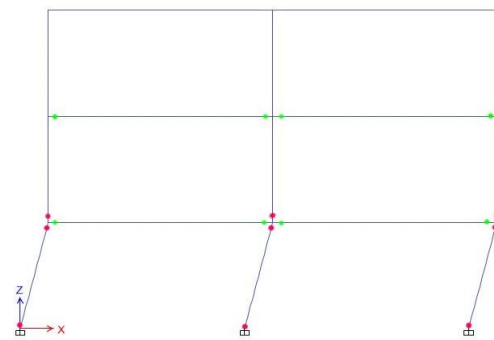


Рисунок 19– Механизм коллапса
(шаговый метод по времени)

Коэффициент K_1 , учитывающий неупругую работу конструкции, в работе рассчитывается по формуле (3). В работе даны вычисленные по двум методам значения K_1 .

В соответствии с методом, принятым в работе:

$$K_1 = \frac{S_y}{S_u} = \frac{S_{24}}{S_{29}} = \frac{11,31}{17,3} = 0,65$$

Из анализа Pushover

$$K_1 = \frac{S_y}{S_u} = \frac{S_2}{S_6} = \frac{12,77}{21,155} = 0,6$$

Результаты расчета показали, что оба метода дают близкие значения перерезывающих усилий в основании и смещений верха сооружения в конце упругой стадии. Шаговый метод по времени учитывает влияние образования пластических шарниров и обрушений в элементах на динамические характеристики: матрицу жесткости, формы колебаний, матрицу нормированных форм колебаний, что, в свою очередь, приводит к изменению значений сейсмических сил и их распределению, а также к различному механизму обрушения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа выполнена в соответствии с задачами исследования. Основные выводы по результатам работы:

1-Предложены и развиты основные (общие) положения расчета зданий и сооружений при кинематических (сейсмических) воздействиях как нелинейных систем с конечным числом степеней свободы, расчетная схема которых представлена, как и в основном нормативном документе (СП 14.13330.2018), в виде упругого стержня с присоединенными на уровнях перекрытий и покрытия массами.

2- В соответствии с принятой расчетной схемой на базе спектрального подхода и шагового метода по времени разработаны алгоритмы и методы расчета конструкций на сейсмические воздействия с учетом изменений конструктивных схем в процессе колебаний.

3-Разработан общий алгоритм нелинейного расчета конструкций зданий с учетом изменений обобщенной жесткости (матрицы жесткости), которая определяется из статического расчета конструкций на действие сейсмических сил, вычисленных на предыдущем этапе и представленных в виде разложения по формам собственных колебаний.

4-Предложена методика оценки коэффициента K_1 (СП 14.13330.2018), учитывающего неупругие деформации, как отношения сейсмических сил, при которых начинается развитие неупругих деформаций, к величинам сейсмических сил, предшествующих началу разрушений конструкций.

На трех примерах расчета проанализированы различные варианты учета неупругих деформаций при оценке несущей способности конструкций

- При образовании пластических шарниров;
- Вычисленные с учетом развития неупругих деформаций в сжато-изогнутых элементах (колоннах) значения коэффициента K_1 заметно выше приведенных в СП 14.13330.2018 для зданий из сборных железобетонных конструкций.

5- Разработаны методика, алгоритмы и программа расчета систем с конечным числом степеней свободы, в том числе, ряда виброзащитных систем (с гасителями колебаний, с выключающимися или разрушающимися связями) при произвольных кинематических, в том числе, сейсмических воздействиях

6-Записаны, практически в замкнутом виде, расчётные зависимости и дан анализ эффективности систем с 2-мя степенями свободы, включающих гасители колебаний с разными схемами установки гасителей (как массы m_1 или m_2), при воздействиях, характерных для машин с вращающимися частями, при всех режимах работы и, в том числе, при прохождении через резонанс;

7-В рамках поставленных в работе задач дана оценка влияния колебаний фундаментов на величину сейсмических сил и, как следствие, на напряженно-деформированное состояние конструкций зданий:

- построены передаточные и импульсные переходные функции, и на их основе – метод расчета горизонтально-вращательных колебаний фундамента на действии горизонтальной составляющей и момента, передающихся от сейсмических сил на верхнюю грань фундамента;
- на двух примерах расчета дана оценка влияния жесткости надфундаментного сооружения на величины дополнительных сейсмических сил, связанных с колебаниями фундамента

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Проведение численных расчетов металлических и деревянных конструкций при сейсмических воздействиях, используя шаговый метод по времени. Определение уточнение значений коэффициента K_1 для отдельных типов сооружений.

Использовать и развивать предложенный подход расчета систем с нелинейными характеристиками при сейсмических воздействиях, основанный на связи ПФ и ИПФ, также и для других типов динамических нагрузок.

Используя предложенный в работе подход, провести численные расчеты сооружений на действие сейсмических сил с учетом смещения фундамента и поиск оптимальных параметров для различных типов фундаментов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Волкова, М. В. Расчет массивных фундаментов, заглубленных в грунт, под виброизолированное и невиброизолированное оборудование / М. В. Волкова, Ю. Т. Чернов, Д. Кбейли // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 7(739). – С. 5-12. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-739-7-5-12.

2. Чернов, Ю. Т. Учет горизонтально-вращательных колебаний фундаментов при вычислении сейсмических сил / Ю. Т. Чернов, Д. Кбейли // Вестник НИЦ

«Строительство». – 2021. – № 7(739). – С. 66-78. – DOI 10.37538/2224-9494-2021-4(31)-66-78.

3. Чернов, Ю. Т. Оценка сейсмических сил при измененных в процессе колебаний конструктивных схемах / Ю. Т. Чернов, Д. Кбейли // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2021. – № 17(4). – С. 391-403. – DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-4-391-403.

Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций, индексируемых в международной реферативной базе Scopus:

1. **Qbaily, J.** Evaluation of the Changes in the Structure's Dynamic Properties on the Seismic Forces During the Vibration Process / **J. Qbaily**, M. Jazzan, Y. Chernov, A. S. Markovich // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2559. – Pp. 050015. – DOI 10.1063/5.0099028.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

1. Чернов, Ю. Т. К расчету конструкций на сейсмические воздействия с учетом изменений конструктивной схемы в процессе колебаний / Ю. Т. Чернов, Д. Кбейли // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2020. – № 3. – С. 19-30. – DOI 10.37153/2618-9283-2020-3-19-30.