УДК 699.841
doi: 10.37538/0039-2383.2026.2.16.30

Сравнительный анализ различных моделей затухания в системах с разнородным демпфированием, подверженных сейсмическому воздействию. Часть II: практика

Дмитрий Евгеньевич БОНДАРЕВ[1], кандидат технических наук,
E-mail: 89523684328@mail.ru

[1] ООО НПФ «СКАД СОФТ», Рубцовская наб., 4, корп. 1, 105082, Москва

Аннотация. *В статье представлен сравнительный анализ различных моделей затухания в системе с разнородным демпфированием, подверженных сейсмическому воздействию. Статья разбита на две части. В первой – описана теоретическая часть. Во второй – практическая. В исследовании принята упрощённая расчётная схема тяжелого и жёсткого здания, расположенного как на жестком, так и на мягком грунте, с металлической надстройкой на крыше. Был выполнен динамический анализ с матрицей диссипаций, сформированной по методу Рэлея, методом, основанном на учете демпфирования в материале (реализованном в программном комплексе SCAD++), неклассическим модальным методом, а также методом с заданием пропорционального демпфирования между массами (идеальное вязкое демпфирование). Показано, что наиболее стабильные результаты как для теста с жёстким, так и для теста с мягким грунтом даёт неклассический модальный метод, а также идеальное вязкое демпфирование.*

Ключевые слова: *матрица диссипаций, разнородное демпфирование, метод Рэлея, материальное демпфирование, SCAD, демпфирование в материале, радиационное демпфирование*

Для цитирования: *Бондарев Д.Е.* Сравнительный анализ различных моделей затухания в системах с разнородным демпфированием, подверженных сейсмическому воздействию. Часть II: практика. Строительная механика и расчет сооружений. 2026. № 2. С. 48–53. doi: 10.37538/0039-2383.2026.2.48.53

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS DISSIPATION MODELS IN SYSTEMS WITH HETEROGENEOUS DAMPING SUBJECTED TO SEISMIC EXCITATION. PART II: APPLICATION

D.E. BONDAREV[1], PhD (engineering), E-mail: 89523684328@mail.ru

[1] SCAD Soft, Rubtsovskaya naberezhnaya, 4, 105082, Moscow

Аннотация. *The article presents a comparative analysis of various dissipation models in a system with heterogeneous damping. The article is divided into two parts. The first part describes the theoretical part. The second one is practical. The study uses a simplified three-degree-of-freedom model of a heavy and rigid building located on both hard and soft soil, with a metal superstructure on the roof. A dynamic analysis was performed with a dissipation matrix formed using the Rayleigh method, a method based on the consideration of damping in the material (implemented in the SCAD++ software package), a non-classical modal method, as well as a method with the assignment of proportional damping between masses (viscous damping). It is shown that the most stable results for both the hard and soft ground test are obtained by the nonclassical modal method, as well as the method with a viscous damping.*

Keywords: *dissipation matrix, heterogeneous damping, Rayleigh's method, material damping, SCAD,damping in a material, radiation damping.*

For citation: *Bondarev D.E.* Comparative analysis of various dissipation models in systems with heterogeneous damping subjected to seismic excitation. Part II: Application. Structural mechanics and analysis of constructions. 2026. No. 2. Pp. 48–53 (in Russian). DOI: 10.37538/0039-2383.2026.2.48.53

Модель с тремя степенями свободы. Задача с жёстким грунтом

В качестве сейсмического воздействия принята акселерограмма землетрясения elcentro. Акселерограмма воздействия и спектр ответа ускорений при пятипроцентном демпфировании представлены на рисунках 1 и 2.

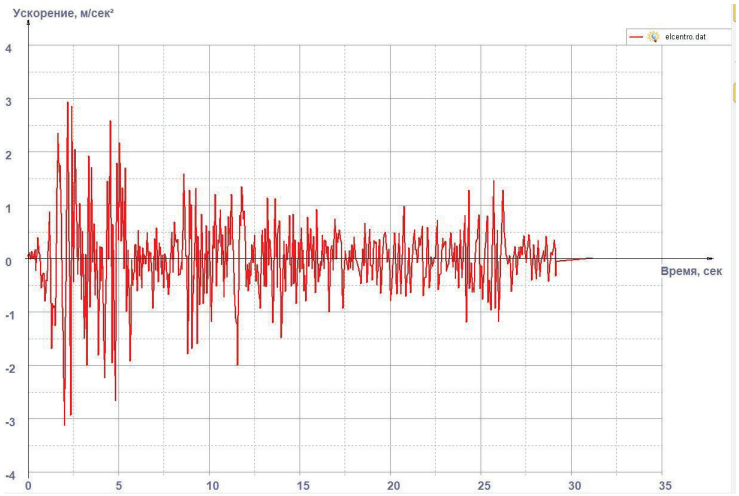

Рисунок 1. Акселерограмма воздействия elcentro. PGA=3.12 м/с^2

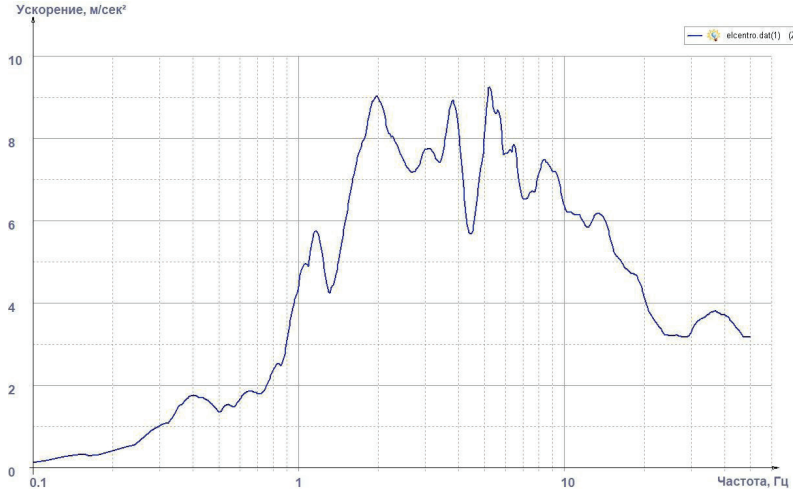

Рисунок 2. Пятипроцентный спектр ответа ускорений

Решим следующую задачу: жёсткое железобетонное здание, на крыше которого есть гибкая металлическая надстройка, опирается на скальный грунт. Грунт имеет жёсткость K_1=198000000 т/м, параметр затухания ξ_1=0.52, масса железобетонной части здания равна $M=M_1+M_2$=107600 т. Железобетонная часть здания имеет жёсткость K_2=2000000 т/м, параметр затухания ξ_2=0.07, металлическая, гибкая часть здания имеет жёсткость K_3=45 т/м, параметр затухания ξ_3=0.04, масса металлической части здания равна M_3=38 т (рисунок 3).

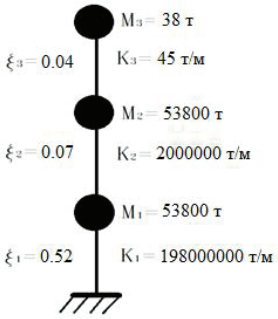

Рисунок 3. Расчётная схемы задачи с жёстким грунтом

Данная модель может быть упрощённой расчётной схемой довольно тяжёлого и жёсткого здания (например, АЭС), расположенного на грунте, и имеющего металлическую надстройку на крыше железобетонной части здания.

Решение задачи модальным методом с матрицей диссипаций, сформированной по методу Рэлея

Вычислим вектор собственных частот системы:

$$[\omega] = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.44 \\ 19.18 \\ 192.82 \end{pmatrix} \text{рад/с} \quad (1)$$

Получим для удобства вектор собственных частот в герцах:

$$[\nu] = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.55 \\ 3.05 \\ 30.69 \end{pmatrix} \text{Гц} \quad (2)$$

Определим векторы собственных форм. Опуская вычисления, которые подробно изложены в [2], приведём результат их вычисления:

$$[\Phi_1] = \begin{pmatrix} 1 \\ 99.97 \\ 4257000 \end{pmatrix};\ [\Phi_2] = \begin{pmatrix} 1 \\ 99.01 \\ -3.292 \end{pmatrix};\ [\Phi_3] = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.01 \\ 0.000003 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Получены модальные массы: $m_1 = 3.7*10^{-4}$, $m_2 = 0.51$, $m_3 = 0.49$.

Построим собственные формы (Рисунок 4):

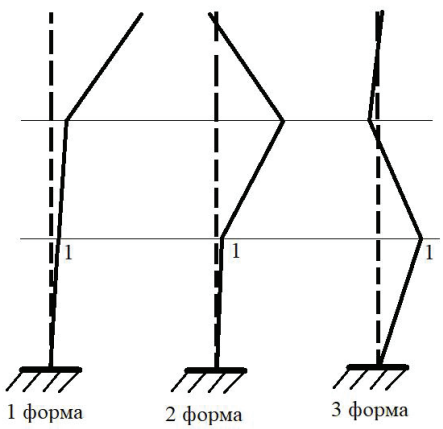

Рисунок 4. Собственные формы колебаний системы, опирающейся на жёсткий грунт

Видно, что первая собственная форма колебаний является колебанием металлической надстройки на железобетонной части здания. При этом железобетонная часть здания почти не движется (имеет малые относительные смещения относительно массы M_3).

Вторая форма колебаний – это колебание железобетонной части здания на грунте. Мы видим, что перемещение массы 1 и 3 мало относительно массы 2 (см. формулу (3)). Третья форма колебаний – это колебание железобетонной части здания на грунте. Мы видим, что перемещение металлической части здания очень мало по сравнению с перемещениями масс 1 и 3.

Как в таком случае правильно учесть демпфирование в конструкциях? Согласно методу Рэлея, мы должны задаться двумя частотами и двумя им соответствующим параметрам затухания. В нашем случае мы имеем три варианта. В качестве двух частот мы можем взять: первую и вторую, первую и третью, вторую и третью частоты. Давайте посмотрим, какие результаты мы получим при том или ином сочетании частот.

Опустим матричные преобразования, благодаря которым возможно разложение движение системы по формам колебаний. Подробно этот процесс описан в [2]. Расчётная схема будет иметь следующий вид (рисунок 5):

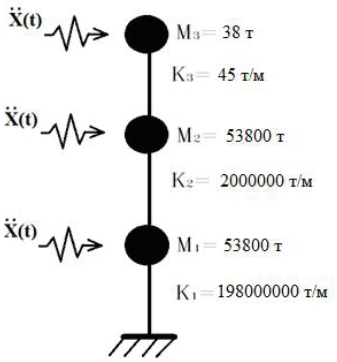

Рисунок 5. Расчётная схема здания, опирающегося на жёсткий грунт

Первый случай: зададим $\omega_1 = 3.44, \omega_2 = 19.18, \xi_1 = 0.04, \xi_2 = 0.07$.

Получим следующие коэффициенты: α =0.195, β =0.00677.

Получим следующий вектор модального демпфирования:

$$[\xi] = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.07 \\ 0.653 \end{pmatrix} \tag{4}$$

Получим следующий вектор собственных частот системы с учётом затухания:

$$[\omega_D] = \begin{pmatrix} \omega_{D,1} \\ \omega_{D,2} \\ \omega_{D,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.438 \\ 19.136 \\ 146.04 \end{pmatrix} \text{рад/с} \tag{5}$$

Мы видим, что на первой и второй частоте мы получаем модальное демпфирование, соответствующее нашим материалам (стали и бетону) (формула 3). А вот на третьей форме мы получаем демпфирование 65% вместо 52%, как было дано по условию задачи. При такой матрице диссипаций мы можем ожидать несколько заниженный результат для ускорений первой массы (результаты расчёта приведены в таблице 1).

Второй случай: зададим $\omega_1 = 3.44, \omega_3 = 192.82, \xi_1 = 0.04, \xi_3 = 0.52$.

Получим следующие коэффициенты: α =0.211, β =0.0054.

Получим следующие модальные демпфирования:

$$[\xi] = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.057 \\ 0.52 \end{pmatrix} \tag{6}$$

Получим следующий вектор собственных частот системы с учётом затухания:

$$[\omega_D] = \begin{pmatrix} \omega_{D,1} \\ \omega_{D,2} \\ \omega_{D,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.438 \\ 19.152 \\ 164.7 \end{pmatrix} \text{рад/с} \tag{7}$$

Мы видим, что на первой и третьей частоте мы получаем модальное демпфирование, соответствующее нашим материалам (формула 6). А вот на второй форме мы получаем демпфирование 5.7% вместо 7%, как было дано по условию задачи. При такой матрице диссипаций мы можем ожидать несколько завышенный результат, если будем оценивать напряжения и ускорения в конструкциях железобетонной части здания (таблица 1).

Третий случай: зададим $\omega_2 = 19.18, \omega_3 = 192.82, \xi_1 = 0.07, \xi_2 = 0.52$.

Получим следующие коэффициенты: α =0.708, β =0.00538.

Получим следующие модальные демпфирования:

$$[\xi] = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.112 \\ 0.07 \\ 0.52 \end{pmatrix} \tag{8}$$

Получим следующий вектор собственных частот системы с учётом затухания:

$$[\omega_D] = \begin{pmatrix} \omega_{D,1} \\ \omega_{D,2} \\ \omega_{D,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.42 \\ 19.136 \\ 164.7 \end{pmatrix} \text{рад/с} \tag{9}$$

Мы видим, что на второй и третьей частоте мы получаем модальное демпфирование, соответствующее нашим материалам. А вот на первой форме мы получаем демпфирование 11%

вместо 4%, как было дано по условию задачи (формула 8). При такой матрице диссипаций мы ожидаем получить несколько заниженный результат, если будем оценивать напряжения и ускорения в металлической надстройке (таблица 1).

Решение задачи с матрицей диссипацией, основанной на учете демпфирования в материале

Произведём три тестовых анализа системы с матрицей диссипаций, сформированной по методу, основанном на учете демпфирования в материале. Откалибруем матрицу диссипаций первой, второй и третьей собственной частотой системы с учётом затухания. Решим в MathCad систему уравнений, представленную в первой части статьи, с вязкостными коэффициентами пропорциональности, поделёнными на $\omega_{D,1}, \omega_{D,2}$, $\omega_{D,3}$, где $\omega_{D,1} = \omega_1$.

$$\sqrt{1-\xi_3^2}, \omega_{D,1} = \omega_2 \cdot \sqrt{1-\xi_2^2}, \omega_{D,3} = \omega_3 \cdot \sqrt{1-\xi_1^2}.$$

Результаты анализа приведены в таблице 1.

Решение системы с заданием пропорционального демпфирования между массами

Решим систему дифференциальных уравнений, представленную в первой части статьи, численным методом в программе MathCad методом Рунге-Кутта 4-ого порядка. Обратите внимание, для определения вязкостных коэффициентов мы используем не собственные частоты всей системы, а парциальные частоты.

Полученный результат представлен в таблице 1.

Решение тестового примера неклассическим модальным методом

Для нашей задачи матрица конструкционного демпфирования будет полностью заполненной и иметь следующий вид[1]:

$$[B] = \begin{pmatrix} 9.48 * 10\text{^}12 & 8.333 * 10\text{^}7 & 3.457 * 10\text{^}6 \\ 8.333 * 10\text{^}7 & 7.547 * 10\text{^}7 & 1.465 * 10\text{^}6 \\ 3.457 * 10\text{^}6 & 1.465 * 10\text{^}6 & 5.347 * 10\text{^}5 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Решим данную задачу неклассическим модальным методом (НММ). Результаты решения неклассическим модальным методом представлены в таблице 1.

Результаты расчёта системы на жёстком грунте

Перед интерпретацией результатов следует сделать важный комментарий. Так как все используемые в статье способы учёта затухания являются лишь моделями, то в данном исследовании трудно судить о том, какое решение считать эталонным. Мы считаем, что эталоном нужно считать корректно поставленный эксперимент и сравнивать нужно упомянутые способы учёта затухания именно с ним. Так как в рамках данного исследования эксперимент не ставился, то корректным решением мы считаем то, что сходится с другим решением. Поэтому, когда ниже мы будем говорить о «сходимости», то мы будем иметь ввиду, что решение данным методом близко к решению, выполненному другим методом.

В таблице 1 представлены максимальные ускорения, возникающих в массах. На рисунках 6-8 изображены пятипроцентные спектры ответа ускорений масс системы. Давайте проанализируем полученные результаты. Для массы 1 мы видим, что все используемые нами методы дают примерно одинаковые результаты как по амплитудному значению ускорений, так и по частотному составу (рисунок 6). Такая сходимость вызвана тем, что грунт очень жёсткий и колебание массы 1 почти полностью повторяет движение грунта в данном случае. Для массы 2 почти идеальную сходимость друг с другом дают: метод Рэлея для первого и третьего случаев, метод учёта демпфирования в материале с калибровкой второй собственной частотой и метод с заданием пропорционального демпфирования между массами. Для массы 3 почти идеальную сходимость дают: метод Рэлея для первого и второго случаев, метод учёта демпфирования в материале с калибровкой первой собственной частотой и метод с заданием пропорционального демпфирования между массами. Отметим, что неклассический модальный метод (НММ) демонстрирует хорошую сходимость для всех трёх масс, но на частотах меньше 5 Гц. На частотах выше 5 Гц НММ даёт завышенный результат по сравнению со всеми остальными методами.

Подведём промежуточный итог: наиболее стабильным методом, дающим хорошую сходимость для всех трёх масс, является метод Рэлея с матрицей диссипацией, построенной по пер-

[1] Формула для вычисления данной матрицы представлена в первой части статьи

вой и второй частоте, а также неклассический модальный метод (НММ) на частотах меньше 5 Гц, а также метод с заданием пропорционального демпфирования между массами.

Таблица 1. Результаты расчёта здания, опирающегося на жёсткий грунт, различными методами

Макс. абс. ускорения / метод учёта затухания	Метод Рэлея. По ω_1 и ω_2	Метод Рэлея. По ω_1 и ω_2	Метод Рэлея. По ω_1 и ω_2	Метод SCAD[2]. Калибровка ω_1	Метод SCAD. Калибровка ω_2	Метод SCAD. Калибровка ω_3	НММ	МЗДПС[3]
Масса 1	3.14	3.14	3.14	3.12	3.13	3.16	3.17	3.14
Масса 2	7.24	7.65	7.24	3.65	7.13	12.9	6.42	7.20
Масса 3	1.81	1.80	1.22	1.69	2.55	2.95	2.14	1.80

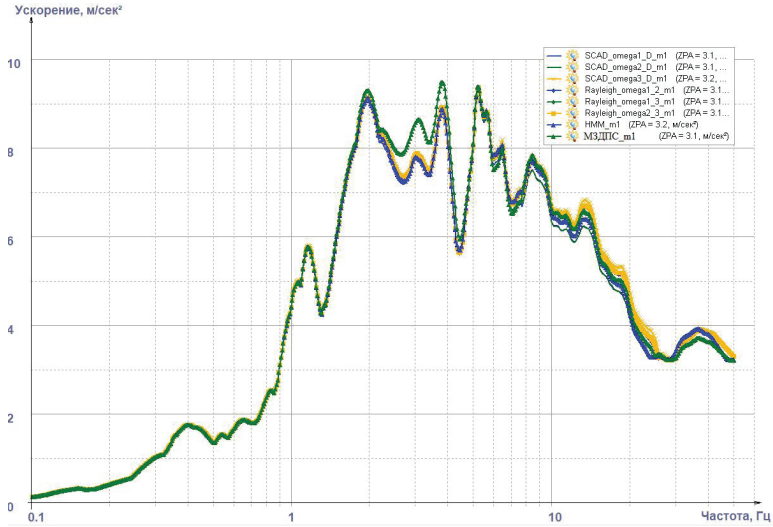

Рисунок 6. Сравнение спектральных ускорений в массе 1, полученных различными методами. Спектр ответа 5%

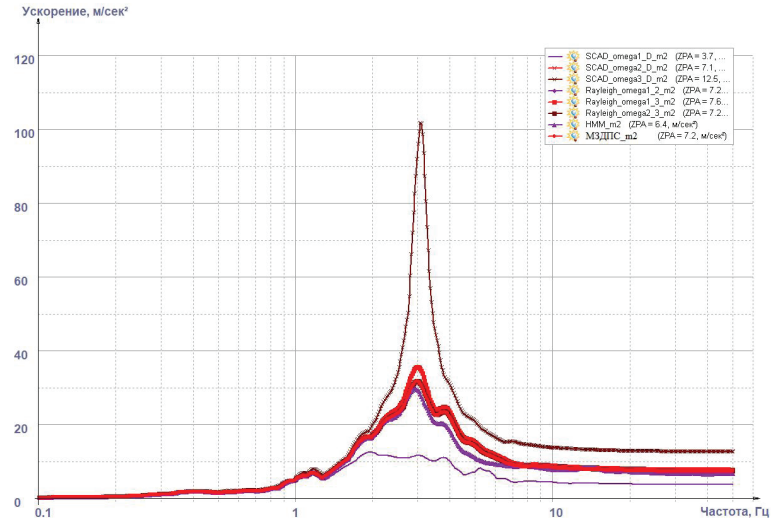

Рисунок 7. Сравнение спектральных ускорений в массе 2, полученных различными методами. Спектр ответа 5%

[2] Под методом SCAD в данной таблице имеется ввиду метод, основанный на учете демпфирования в материале, реализованный в ПК SCAD++.

[3] Метод с заданием демпфирования, пропорционального скорости между массами (МЗДПС).

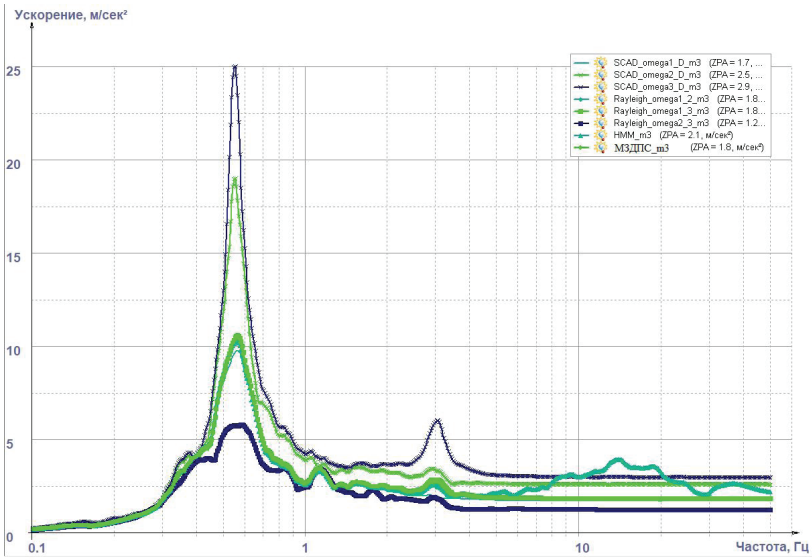

Рисунок 8. Сравнение спектральных ускорений в массе 3, полученных различными методами. Спектр ответа 5%

Решим ещё одну задачу, теперь зададим мягкий грунт, что вызовет связанность колебаний масс друг с другом.

Модель с тремя степенями свободы. Случай мягкого грунта

В тестовом примере с жёстким грунтом мы получили хорошую сходимость метода Рэлея с коэффициентами α и β, задаваемыми по первым двум частотам, с методом с явным заданием демпфирования, а также с НММ на частотном диапазоне до 5 Гц. Это произошло за счёт того, что в случае жёсткого грунта у нас колебания массы почти не были связаны друг с другом, а также за счёт того, что модальное демпфирование третьей формы колебаний в методе Рэлея (ξ_3=0.653) (формула 3) оказалось близким к параметру затухания элемента, моделирующего грунт (ξ_1=0.52).

Решим несколько иную задачу: теперь наше железобетонное здание с металлической надстройкой на крыше будет опираться на мягкий грунт. Грунт имеет жёсткость K_1=500000 т/м, параметр затухания возьмём ξ_1=0.72, все остальные параметры модели оставим прежними (рисунок 9).

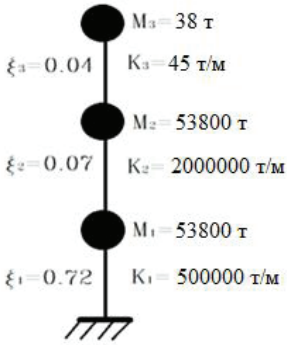

Рисунок 9. Расчётная схема здания, опирающегося на мягкий грунт

Для задачи с мягким грунтом вектор собственных частот системы будет иметь следующий вид:

$$[\omega] = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.44 \\ 6.60 \\ 28.16 \end{pmatrix} \text{рад/с} \tag{11}$$

Вектор собственных частот в герцах:

$$[\nu] = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.55 \\ 1.05 \\ 4.48 \end{pmatrix} \text{Гц} \tag{12}$$

Определим векторы собственных форм:

$$[\Phi_1] = \begin{pmatrix} 1 \\ 1.22 \\ 7972 \end{pmatrix};\ [\Phi_2] = \begin{pmatrix} 1 \\ 1.133 \\ -0.423 \end{pmatrix};\ [\Phi_3] = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.883 \\ 0.013 \end{pmatrix} \tag{13}$$

Получены модальные массы: $m_1 = 7*10^{-4}$, $m_2 = 0.9955$, $m_3 = 4*10^{-3}$.

Собственные формы будут иметь следующий вид (Рисунок 10):

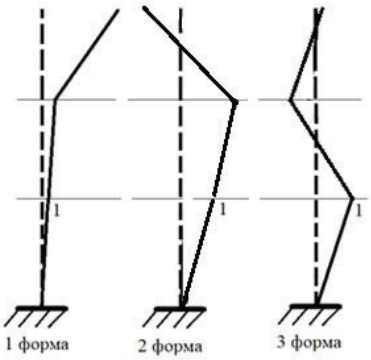

Рисунок 10. Собственные формы колебаний системы, опирающейся на мягкий грунт

Обратите внимание, что изменилась вторая и третья формы колебаний (рисунок 10). Для второй и третьей форм колебания масс теперь имеют совместный характер. Это говорит о том, что в данной задаче довольно трудно предсказать, как модальное демпфирование на той или иной частоте будет влиять на возникающие ускорения в массах.

Первый случай. Для подсчёта коэффициентов Рэлея по первым двум частотам зададим $\omega_1 = 3.44, \omega_2 = 6.60, \xi_1 = 0.04, \xi_2 = 0.07$. Получим следующие коэффициенты: α=0.033, β=0.02.

Получим следующие модальные демпфирования:

$$[\xi] = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.07 \\ 0.288 \end{pmatrix} \tag{14}$$

Получим следующий вектор собственных частот системы с учётом затухания:

$$[\omega_D] = \begin{pmatrix} \omega_{D,1} \\ \omega_{D,2} \\ \omega_{D,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.44 \\ 6.585 \\ 26.961 \end{pmatrix} \text{рад/с} \tag{15}$$

Обратите внимание, что теперь модальное демпфирование для третьей формы не ξ_3=0.653, как это было в случае жёсткого грунта, а ξ_3=0.288. Это значит, что с такой матрицей диссипации мы получим, скорее всего, завышенный результат для первой массы.

Но у нас есть ещё два варианта: задать коэффициенты Рэлея по второй и третьей частотам, а также по первой и третьей.

Второй случай. Зададим по первой и третьей частоте $\omega_1 = 3.44, \omega_3 = 28.16, \xi_1 = 0.04, \xi_3 = 0.72$.

Получим следующие коэффициенты: α=-0.335, β=0.052.

Получим следующие модальные демпфирования:

$$[\xi] = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.145 \\ 0.72 \end{pmatrix} \tag{16}$$

Получим следующий вектор собственных частот системы с учётом затухания:

$$[\omega_D] = \begin{pmatrix} \omega_{D,1} \\ \omega_{D,2} \\ \omega_{D,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.44 \\ 6.532 \\ 19.541 \end{pmatrix} \text{рад/с} \tag{17}$$

Мы видим, что на первой форме мы получаем демпфирование 4%. Колебание массы металлической надстройки происходит независимо от других масс (Рисунок 10). Это говорит о том, что, скорее всего, в массе металлической надстройки мы получим более-менее корректный результат. Какие мы получим ускорения во второй и третьей массах нам довольно трудно предсказать.

Третий случай. Остался третий вариант: задать по второй и третьей частотам. Зададим по первой и третьей частоте $\omega_1 = 6.60, \omega_3 = 28.16, \xi_1 = 0.07, \xi_3 = 0.72$.

Получим следующие коэффициенты: α=-1.38, β=0.053.

Получим следующие модальные демпфирования:

$$[\xi] = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.11 \\ 0.07 \\ 0.72 \end{pmatrix} \tag{18}$$

Обратите внимание, что для первой формы мы получили отрицательное значение! Это говорит о том, что мы вообще не сможем выполнить расчёт, если будем формировать матрицу диссипации с такими коэффициентами α и β. В программе SCAD++ расчёт выполнится, но результат будет некорректным.

Произведём расчёты данной системы другими методами.

Таблица 2. Результаты расчёта здания, опирающегося на мягкий грунт, различными методами

Макс. абс. ускорения / метод учёта затухания	Метод Рэлея. По ω_1 и ω_2	Метод Рэлея. По ω_1 и ω_2	Метод Рэлея. По ω_1 и ω_2	Метод SCAD[4]. Калибровка ω_1	Метод SCAD. Калибровка ω_2	Метод SCAD. Калибровка ω_3	НММ	МЗДПС
Масса 1	3.87	2.38	-	2.27	1.93	2.92	2.02	2.03
Масса 2	4.51	2.81	-	2.79	2.38	2.95	2.44	2.26
Масса 3	2.58	2.31	-	1.62	2.60	3.22	2.11	2.16

Результаты расчёта системы на мягком грунте

В таблице 2 представлены максимальные ускорения, возникающих в массах. На рисунках 11-13 изображены пятипроцентные спектры ответа ускорений масс системы. Давайте проанализируем полученные результаты. Для массы 1 хорошую сходимость друг с другом дают: метод учёта демпфирования в материале с калибровкой первой, а также второй собственной частотой, неклассический модальный метод (НММ) и метод с заданием пропорционального демпфирования между массами. Отметим, что НММ демонстрирует хорошую сходимость на частотах меньше 8 Гц. На частотах выше 8 Гц НММ даёт несколько завышенный результат. Для массы 2 хорошую сходимость дают: метод учёта демпфирования в материале с калибровкой первой, а также второй собственной частотой, НММ и метод с заданием пропорционального демпфирования между массами. Заметим, что НММ в данном случае не даёт завышенный результат на частотах выше 8 Гц. А метод учёта демпфирования в материале с калибровкой первой частотой даёт несколько завышенное амплитудное значение ускорения массы. Для массы 3 хорошую сходимость дают: метод Рэлея для первого и второго случаев, метод учёта демпфирования в материале с калибровкой первой, а также второй собственной частотой, НММ и метод с заданием пропорционального демпфирования между массами. Отметим, что НММ демонстрирует хорошую сходимость на частотах меньше 8 Гц. На частотах выше 8 Гц НММ даёт несколько завышенный результат.

Подведём промежуточный итог: наиболее стабильным методом, дающим хорошую сходимость для всех трёх масс, является метод учёта демпфирования в материале с калибровкой первой, а также второй собственной частотой, неклассический модальный метод (НММ) на частотах меньше 8 Гц, а также метод с заданием пропорционального демпфирования между массами.

Лаборатория надежности сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

- Разработка нормативно-технической документации в области надежности сооружений, нагрузок и воздействий, включая Своды Правил, ГОСТы, СТО, Рекомендации;
- Научно-техническое сопровождение модельных испытаний зданий и сооружений в аэродинамических трубах;
- Проведение исследований в области экстремальных климатических, взрывных, ударных и других особых нагрузок, оценки рисков прогрессирующего обрушения строительных конструкций.

Тел.: +7 (499) 174-77-35 E-mail: ilebedeva61@gmail.com

[4] Под методом SCAD в данной таблице имеется ввиду метод, основанный на учете демпфирования в материале, реализованный в ПК SCAD++.

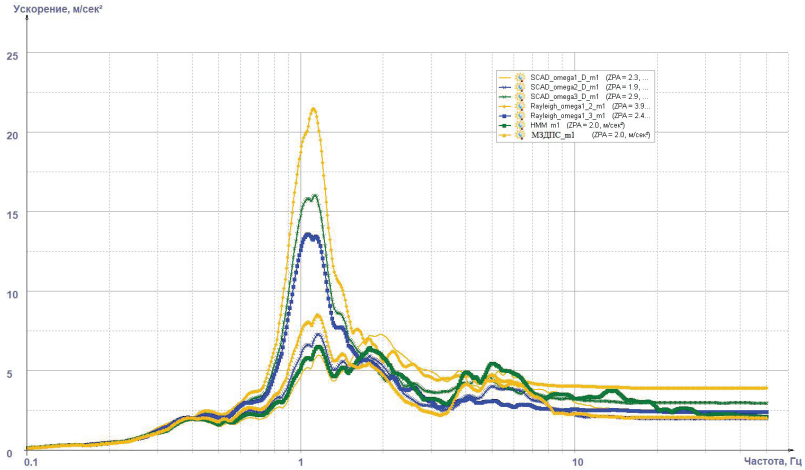

Рисунок 11. Сравнение спектральных ускорений в массе 1, полученных различными методами. Спектр ответа 5%

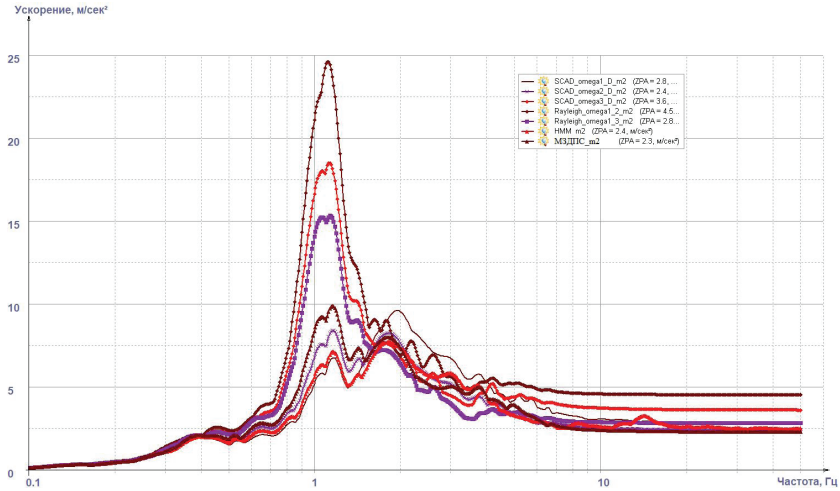

Рисунок 12. Сравнение спектральных ускорений в массе 2, полученных различными методами. Спектр ответа 5%

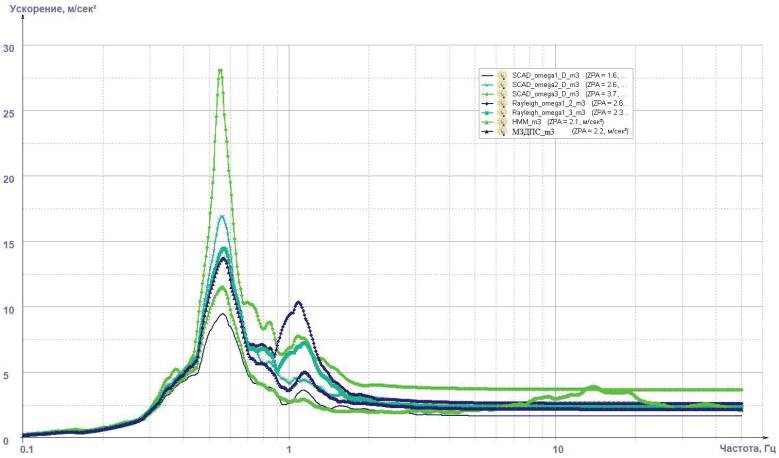

Рисунок 13. Сравнение спектральных ускорений в массе 3, полученных различными методами. Спектр ответа 5%

Заключение

В данной статье были проанализированы расчетные модели с разнородным демпфированием. Показано, что наиболее стабильные результаты как для теста с жёстким, так и для теста с мягким грунтом даёт неклассический модальный метод, а также метод с явным заданием демпфирования пропорционального скорости между массами. Также хорошую сходимость в сравнении с остальными методами дал метод Рэлея в задаче с жёстким грунтом. Следует добавить, что метод учёта затухания в материале дал хорошую сходимость для задачи с мягким грунтом.

Для получения объективного научного результата необходимо поставить эксперимент, результат которого можно было бы считать эталонным. Поэтому в будущем необходимо сравнить численные решения уравнений движения с различными моделями диссипаций с корректно поставленным экспериментом, поскольку логарифмический декремент колебаний на является физической константой.

Список литературы

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.
2. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979.
3. Chopra Anil K. Dynamics of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 944 p.
4. Турилов В.В., Уткин И.А. Применение метода модальной суперпозиции в неклассической форме для решения задач взаимодействия зданий и сооружений АЭС с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 2. С. 30-35.
5. ASCE 4-16. Seismic analysis of safety related nuclear structures. 2017.
6. Fialko, S., Karpilovskyi, V. Time history analysis formulation in SCAD FEA software. Journal of Measurements in Engineering, Vol. 6, Issue 4, 2018, p. 173-180..
7. В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, С.Ю. Фиалко. SCAD Office. Версия 21: Вычислительный комплекс SCAD++. Изд. 2, поправ., дополн. Издательство СКАД СОФТ. Издательство Ассоциации строительных вузов. Москва 2018.

References

1. Birbraer A.N. Calculation of structures for earthquake resistance. St. Petersburg: Nauka Publ., 1998. 255 p. (in Russian).
2. Clough R., Penzien J. Dynamics of structures. Moscow: Stroyizdat, 1979 (in Russian).
3. Chopra Anil K. Dynamics of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 944 p.
4. Turilov V.V., Utkin I.A. Application of the modal superposition method in a non-classical form to solve problems of interaction of buildings and structures of nuclear power plants with the ground base under seismic influences. Earthquake-resistant construction. Safety of structures. 2017. No. 2. Pp. 30–35 (in Russian).
5. ASCE 4-16. Seismic analysis of safety related nuclear structures. 2017 (in Russian).
6. Fialko S., Karpilovskyi V. Time history analysis formulation in SCAD FEA software. Journal of Measurements in Engineering, 2018. Vol. 6. Iss. 4. Pp. 173–180. DOI: 10.21595/jme.2018.20408.
7. Karpilovsky V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A., Fialko S.Yu. SCAD Office. Version 21: Computing complex SCAD++. Ed. 2, amendment, supplement. SCAD SOFT Publishing House. Publishing House of theAssociation of Construction Universities. Moscow, 2018 (in Russian).

Лаборатория деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

- Разработка нормативно-технической документации по деревянным конструкциям, включая СП (СНиПы), ГОСТы, СТО, Рекомендации;
- Разработка и исследование новых видов конструкций, их соединений и узлов;
- Испытания строительных конструкций из древесины и древесных материалов;
- Обследование деревянных конструкций зданий и сооружений, составление заключений о состоянии и разработка рекомендаций по усилению и реконструкции;
- Проектирование каркасов зданий и сооружений из деревянных конструкций различного назначения пролетами до 150 м на стадиях «П», «КД», «КДД»;
- Экспертиза проектов, научно-техническое сопровождение строительства зданий и сооружений с применением деревянных конструкций;
- Разработка СТУ для зданий и сооружений с применением конструкций из древесины и древесных материалов;
- Сертификация строительных деревянных конструкцийи их производства, сертификационные испытания.

Тел.: (499) 174-77-40; 174-77-45 | E-mail: tsniiskldk@yandex.ru, spair23@list.ru
Сайт: https://www.cstroy.ru/tsniisk/ldk/