

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-4-374-387

УДК 624.04

EDN: LWBXNO

Научная статья / Research article

Расчет виброизолирующей системы здания с нелинейными характеристиками при кинематическом воздействии (смещении основания)

Д. Кбейли¹  , Ю.Т. Чернов² ¹ ИнжГеоСервис, Москва, Россия² Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва, Россия jaafarqbaily@gmail.com

Поступила в редакцию: 14 мая 2024 г.

Принята к публикации: 17 июля 2024 г.

Аннотация. Виброизолирующие системы играют важную роль в защите зданий от сейсмических повреждений. Так как они состоят из элементов с нелинейными характеристиками, расчетные модели виброизолирующих систем требуют разработки методов с учетом изменения динамических характеристик сооружения (матрицы жесткости или податливости), частот и форм собственных колебаний. В исследовании предложен алгоритм и зависимости, основанные на возможности выключения или разрушения дополнительных связей (элементы с нелинейными характеристиками) при определении сейсмических сил и перемещений сооружений при сейсмическом воздействии. Результаты тестовых расчетов показали, что амплитудно-частотная характеристика, перемещение и поперечная сила в основании сооружения уменьшились при выключении или разрушении дополнительных связей. Таким образом, предлагаемая методика, учитывающая работу виброизолирующих систем с нелинейными связями, позволяет снизить материальный, экономический и человеческий ущерб при сейсмическом воздействии. Полученные результаты показали, что зависимости алгоритма расчета, разработанные в работе, можно использовать в инженерной практике при оценке динамического поведения виброизолированной системы здания (амплитудно-частотная характеристика) в процессе колебаний при сейсмическом воздействии.

Ключевые слова: динамические характеристики, сейсмические воздействия, сейсмоизоляция здания, амплитудно-частотная характеристика

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Нераздельное соавторство

Для цитирования. Кбейли Д., Чернов Ю.Т. Расчет виброизолирующей системы здания с нелинейными характеристиками при кинематическом воздействии (смещении основания) // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 4. С. 374–387. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-374-387>

Кбейли Джаафар, кандидат технических наук, инженер-конструктор проектного сектора ПИО, ООО «ИнжГеоСервис», Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8790-7877, ORCID: 0000-0002-3875-9413; e-mail: jaafarqbaily@gmail.com

Чернов Юрий Тихонович, доктор технических наук, профессор кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2375-6712, ORCID: 0000-0002-0808-9981; e-mail: chernovyt@mgsu.ru

© Кбейли Д., Чернов Ю.Т., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Calculation of a Vibration-Isolated Building System with Non-Linear Characteristics Under Kinematic Action (Base Displacement)

Jaafar Qbaily¹  , Yury T. Chernov² 

¹ Inggeoservice, Moscow, Russia

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

✉ jaafarqbaily@gmail.com

Received: May 14, 2024

Accepted: July 17, 2024

Abstract. Vibration isolation systems play a major role in protecting buildings from seismic damage. Since they consist of elements with non-linear characteristics, the calculation models of the vibration isolation system require taking into account changes in the dynamic characteristics of the structure (stiffness or compliance matrix), frequencies and forms of natural vibrations. The study proposes an algorithm and dependencies which are based on the possibility of the disconnection or the destruction of the additional connections (elements with non-linear characteristics) due to certain seismic forces and displacement of structures under seismic impact. The results showed that the amplitude-frequency response, displacement, and shear force at the base of the structure decreased when additional connections were disconnected or destroyed. Thus, the proposed method, which takes into account the operation of vibration isolation systems with nonlinear connections, allows reducing the material, economic and human damage during seismic action. The obtained results of the example show that the dependences of the calculation algorithm developed in the work can be used in engineering practice when evaluating the dynamic behavior of a vibration-insulated building system (amplitude-frequency response) during vibrations under seismic influence.

Keywords: dynamic impacts, seismic impacts, building seismic isolation, amplitude-frequency response

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution. Undivided co-authorship.

For citation: Qbaily J., Chernov Yu.T. Calculation of a vibration-isolated building system with non-linear characteristics under kinematic action (base displacement). *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(4):374–387. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-374-387>

1. Введение

Значительное число систем виброизоляции для повышения эффективности виброзащиты включает в себя отдельные нелинейные элементы. Эти элементы могут быть либо включены в систему конструктивно (виброизоляция, динамические гасители и т.п.), либо возникать в процессе деформирования конструкций при интенсивных динамических воздействиях как выключающиеся или разрушающиеся элементы [1–3].

Системы сейсмической защиты достаточно многочисленны, разнообразны и направлены на защиту гражданских конструкций и их неструктурных компонентов при сейсмических воздействиях [4; 5].

Во многих случаях виброизоляция обеспечивается в основном за счет введения между надземной частью конструкции и фундаментом гибкого горизонтального интерфейса с высоким внутренним демпфированием [6–8].

В настоящее время наиболее часто используются следующие варианты для сейсмоизоляции.

1. Устройство бетонного слоя с демпфирующими характеристиками вокруг фундамента с целью изоляции зданий от вибраций во время землетрясения — такой бетон готовится с использованием различного процентного содержания резиновой крошки и стального шлака в качестве заполнителя [9].

Jaafar Qbaily, Candidate of Technical Sciences, Design Engineer of the Design Sector PIO, LLC “Inggeoservice”, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8790-7877, ORCID: 0000-0002-3875-9413; e-mail: jaafarqbaily@gmail.com

Yury T. Chernov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Structural Mechanics Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2375-6712, ORCID: 0000-0002-0808-9981; e-mail: chernovyt@mgsu.ru

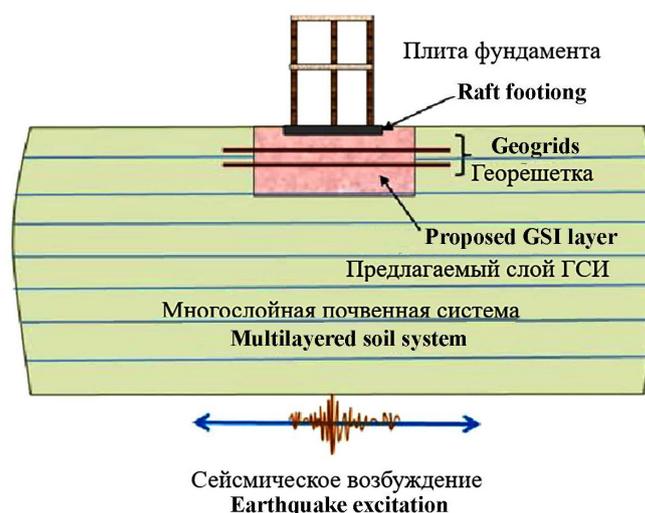


Рис. 3. Здание с системой геотехнической сейсмоизоляции
И с т о ч н и к: А. Boominathathan [14]

Figure 3. Building with geotechnical seismic isolation system
S o u r c e: A. Boominathathan [14]

5. Здания с вязкими демпферами. Вязкостной демпфер, считается пассивным устройством рассеивания энергии. Применяется в гражданских конструкциях для изменения динамических характеристик конструкций, подверженных землетрясению или ветровым воздействиям (рис. 4).



Рис. 4. Вязкостный демпфер
И с т о ч н и к: <https://www.taylordevices.com/direct-acting-damping/>

Figure 4. Viscous damper
S o u r c e: <https://www.taylordevices.com/direct-acting-damping/>

Данный тип сейсмоизоляции показывает хорошие характеристики по уменьшению значений реакции конструкции, перемещений, смещения между этажами и воздействия на основание соответственно. Суть метода основана на оценке отключения или разрушения дополнительных связей, которые находятся между несущей системой и фундаментами во время колебаний. Отключение или разрушение дополнительных связей приводит к изменениям конструктивной схемы в процессе колебаний, в том числе динамических характеристик сооружения (матрицы жесткости или податливости), собственных частот и форм колебаний [15].

Собственные частоты виброизолированной системы приблизительно снижают уровень колебаний (значения амплитудно-частотных характеристик). Подобные системы виброизоляции можно оценить с помощью коэффициента динамичности:

$$A = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\rho^2}},$$

где ω — частота вынужденных колебаний; ρ — частота собственных колебаний.

2. Алгоритмы расчета

2.1. Алгоритм расчета системы с одной степенью свободы с выключенными связями при кинематическом воздействии (смещении основания)

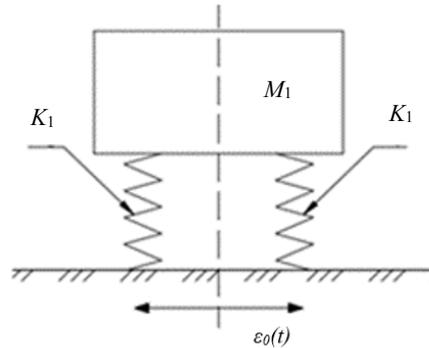


Рис. 5. Система с одной степенью свободы с выключенными связями:

K_1 — жесткость системы; K_2 — жесткости виброизоляторов; $\epsilon_0(t)$ — закон смещения основания.

И с т о ч н и к: выполнено Д. Кбейли

Figure 5. A one level of freedom system with disconnected constraints

K_1 — stiffness of the system; K_2 — stiffness of vibration isolators; $\epsilon_0(t)$ — base displacement function.

S o u r c e: made by J. Qbaily

Уравнение движения нелинейной системы (рис. 5) (активная виброизоляция) имеет вид

$$My + \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) C(y) y = -M\epsilon_0. \quad (1)$$

Для принятого типа нелинейности зависимость «реакции — перемещения»

$$C(y) y = K_1 y \quad \text{при } y \leq y_0,$$

$$C(y) y = K_1 y - K_2 (y - y_0) \quad \text{при } y > y_0, \quad (2)$$

где y_0 — перемещение системы при выключении связи.

При построении алгоритма уравнение (1) следует преобразовать, а именно перенести нелинейные составляющие в правую часть и добавить к обеим частям уравнения

$$\begin{aligned} & \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) p_1^2 y; \\ \ddot{y} + \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) p_1^2 y &= -\ddot{\epsilon}_0 + \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) p_1^2 y - \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) C(y) y, \end{aligned} \quad (3)$$

где $p_1^2 = \frac{M_1}{K_1}$.

Для зависимости вида (2) уравнения движения системы с одной степенью свободы с нелинейной связью (3) примет вид

$$\ddot{y} + \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) p_1^2 y = -\ddot{\varepsilon}_0 + \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) \frac{K_2(y - y_0)}{m}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) представляется в виде двух решений: линейной системы на смещения основания и на фиктивную нагрузку, которая зависит от вида нелинейности $\left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) K_2 - y_0$,

$$y = y_{\text{л}} - y_{\text{нл}}. \quad (5)$$

Решение уравнения от смещения основания где

$$\begin{aligned} y_{\text{л}} &= \frac{-1}{p_1^* M} \int_0^t \ddot{\varepsilon}_0(\tau) e^{-n_1(t-\tau)} \sin p_1^*(t-\tau) d(\tau); \\ y_{\text{л}} &= \frac{-1}{p_1^* M} \int_0^t \ddot{\varepsilon}_0(\tau) e^{-n_1(t-\tau)} [\sin p_1^* t \cos p_1^* \tau - \sin p_1^* \tau \cos p_1^* t] d(\tau) = \\ &= \frac{-1}{p_1^* M} [d_1(t) F_2(t) - d_2(t) F_1(t)], \end{aligned} \quad (6)$$

где $2n_1 = 2\nu p_1^2$, $p_1^* = \sqrt{p_1^2 - n_1^2}$.

$$d_1(t) = e^{-n_1 t} \sin p_1 t; \quad d_2(t) = e^{-n_1 t} \cos p_1 t, \quad (7)$$

$$F_1 = \int_0^t \ddot{\varepsilon}_0(\tau) e^{-n_1 \tau} \sin p_1^* \tau d(\tau); \quad F_{12} = \int_0^t \ddot{\varepsilon}_0(\tau) e^{-n_1 \tau} \cos p_1^* \tau d(\tau). \quad (8)$$

Нелинейная составляющая решения определяется из интегрального уравнения

$$y_{\text{нл}} = \frac{-1}{p_1^* M} \int_{t_0}^t \left(1 + 2\nu \frac{d}{dt}\right) K_2(y - y_0) e^{-n_1(t-\tau)} \sin p_1^*(t-\tau) d(\tau), \quad (9)$$

где t_0 — время первого включения дополнительной связи в процессе колебаний.

Следуя (7), (8) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} y_{\text{нл}} &= \frac{K_2}{p_1^* M} \int_{t_0}^t (y - y_0) e^{-n_1(t-\tau)} [\sin p_1^* t \cos p_1^* \tau - \sin p_1^* \tau \cos p_1^* t] d(\tau); \\ y_{\text{нл}} &= \frac{K_2}{p_1^* M} [d_1(t) F_2(t_0, t) - d_2(t) F_1(t_0, t)] d(\tau), \end{aligned} \quad (10)$$

где $F_1(t_0, t) = \int_{t_0}^t \lambda_1(y \pm y_0) \cos p_1^* \tau d(\tau)$.

Полное перемещение вычисляется по формуле (6).

Знак ((+)) в (10) при $y(t) \leq 0$

$\lambda_1 = 0$ при $y \leq y_0$, $\lambda_1 = 1$ при $y > y_0$.

Учитывая (16), разрешающую систему уравнений можно записать в виде системы линейных уравнений (17) и дополнительной системы (18), которая учитывает нелинейную составляющую

$$M\ddot{\bar{Y}} + K\bar{Y} = M\ddot{\xi}_0 \quad (17)$$

можно записать

$$M\ddot{\bar{Y}} + k\bar{Y} = \bar{\beta}_i, \quad (18)$$

где

$$\bar{\beta}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix}, \text{ где } \beta_n = R_n - \sum_{i=1}^n k_{ni}(y_i - y_{0i}) = R_{\text{доп}}. \quad (19)$$

Решение для основной системы удобно представить в виде разложения по собственным формам в виде

$$\Phi M \Phi \ddot{\bar{Y}} + \Phi K \Phi \bar{Y} = \bar{\beta}_i, \quad (20)$$

где $\bar{\beta}_i = \Phi M \xi_0^2$ для дополнительной системы

$$\bar{\beta}_d = \Phi \beta_d \quad \text{или} \quad \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{21} & \dots & Y_{n1} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ R_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{n1} \\ Y_{n2} \\ \dots \\ Y_{nn} \end{pmatrix} * R_d. \quad (21)$$

Жесткости виброизоляторов на первом шаге расчета $K_{\text{сум}} = M_{\text{зд}} (2\pi\rho)^2$, где $M_{\text{зд}}$ — масса всего здания.

3. Пример расчета

Рассмотрено 3-этажное виброизолированное железобетонное здание, симметричное в схеме, с высотой этажа 3,5 м, свойства и характеристики материалов и элементов конструкций приняты в соответствии с нормами РФ (рис. 8–10).

Составив уравнения движения (системы виброизоляторов выключены), определим частоты, периоды, матрицу жесткости k и матрицу масс M (т),

$$T = \begin{pmatrix} 0,095 \\ 0,17 \\ 0,555 \end{pmatrix} \text{ (с)} \quad \omega = \begin{pmatrix} 10,6 \\ 5,88 \\ 1,8 \end{pmatrix} \text{ (Гц)}$$

$$M = \begin{pmatrix} 67,31 & 0 & 0 \\ 0 & 67,31 & 0 \\ 0 & 0 & 60,61 \end{pmatrix} \text{ (т)} \quad k = \begin{pmatrix} 175424,843 & -107559,047 & 21531,282 \\ -107559,047 & 159578,255 & -75159,107 \\ 21531,282 & -75159,107 & 56528,263 \end{pmatrix} \text{ (т/м)}$$

Матрица масс Матрица жесткости

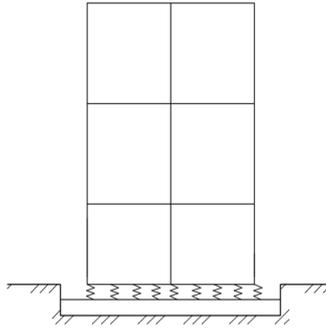


Рис. 8. Разрез здания
Источник: выполнено Д. Кбейли
Figure 8. Building section
Source: made by J. Qbaily

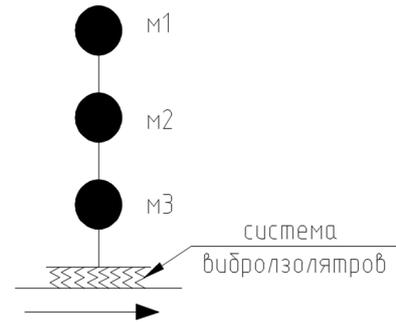


Рис. 9. Расчетная динамическая схема здания
Источник: выполнено Д. Кбейли
Figure 9. Estimated dynamic scheme of the building
Source: made by J. Qbaily

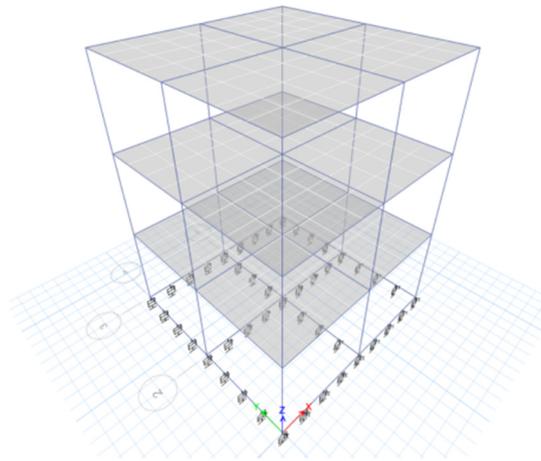


Рис. 10. Расчетная динамическая схема в расчетной программе
Источник: выполнено Д. Кбейли
Figure 10. Dynamic calculation scheme in the calculation program
Source: made by J. Qbaily

Количество виброизоляторов определяется в соответствии с несущей способностью при $\rho = 10 \text{ Гц}$. $K_{\text{сум}} = M_{\text{зд}} (2 \cdot \pi \cdot \rho)^2 = 770737,14 \text{ кН/м}$.

На первом шаге определяем жесткость здания, сейсмические силы и перемещения верхнего этажа при жесткости виброизоляторов: $K_{\text{сум}} = K_1$, на втором шаге $K_2 = 0,95K_1$, и т.д., а также амплитудно-частотную характеристик

$$A = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\rho^2}}$$

При расчете использовались системы компьютерной математики MATHCAD и программный комплекс ETABS.

Здание находится в сейсмической зоне (8 баллов), категория грунта I, спектр реакции для этой области согласно нормам СП 14.13330.2018¹ показан на рис. 11.

На рис. 12 показаны перемещения верхнего этажа здания.

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. М.: Стандартинформ, 2018. 114 с.

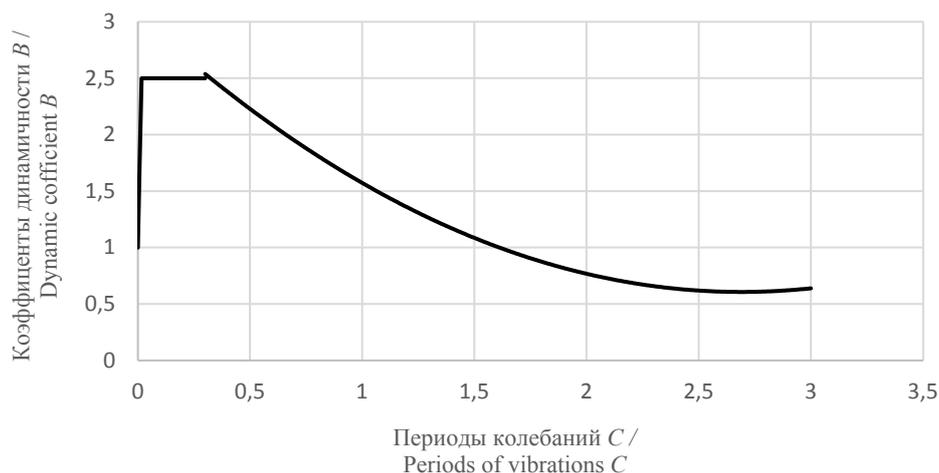


Рис. 11. Значение коэффициента динамичности
И с т о ч н и к: СП 14 13330 2018¹

Figure 11. The value of the dynamic coefficient
S o u r c e: СП 14 13330 2018¹

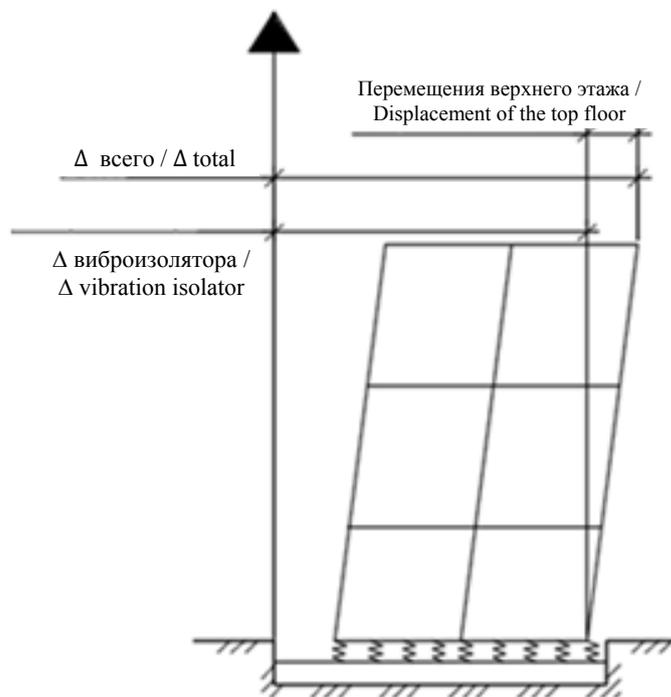


Рис. 12. Перемещения верхнего этажа
И с т о ч н и к: выполнено Д. Кбейли

Figure 12. Displacement of the top floor
S o u r c e: made by J. Qbaily

4. Результаты и обсуждение

После завершения расчетов были получены сейсмические силы, частоты, периоды и матрица жесткости (табл. 1).

С помощью данных табл. 1 были построены графики, представленные на рис. 13 и 14.

Таблица 1

Результаты численного моделирования

% K_1	Жесткости виброизоляторов K_1 , кН/м	Поперечная сила в основании S , кН	Перемещение верха сооружения Δ_{top} , мм	ρ , Гц	Амплитудно-частотная характеристика A	ω/ρ
0,95	732195	247,49	12	9,75	5,180722	1,113191
0,9	693000	243,98	11,9	9,48	4,233316	1,144238
0,85	655200	240,49	11,7	9,22	3,598649	1,176782
0,8	616500	237,17	11,58	8,94	3,119788	1,213155
0,75	577800	233,5	11,4	8,66	2,753401	1,253124
0,7	539100	229,5	11,2	8,36	2,464027	1,297323
0,65	500400	224,6	10,96	8,06	2,229692	1,346555
0,6	462420	221	10,78	7,75	2,039354	1,400763
0,55	423900	216	10,5	7,42	1,876857	1,463023
0,5	385200	208,2	10,1	7,07	1,737746	1,534757

Источники: выполнено Д. Кбейли

Table 1

Results of numerical modeling

% K_1	Stiffness of vibration isolators K_1 , kN/m	Shear force at the base S , kN	Displacement of the top of the structure Δ_{top} , mm	ρ , GHz	Amplitude frequency response A	ω/ρ
0.95	732195	247.49	12	9.75	5.180722	1.113191
0.9	693000	243.98	11.9	9.48	4.233316	1.144238
0.85	655200	240.49	11.7	9.22	3.598649	1.176782
0.8	616500	237.17	11.58	8.94	3.119788	1.213155
0.75	577800	233.5	11.4	8.66	2.753401	1.253124
0.7	539100	229.5	11.2	8.36	2.464027	1.297323
0.65	500400	224.6	10.96	8.06	2.229692	1.346555
0.6	462420	221	10.78	7.75	2.039354	1.400763
0.55	423900	216	10.5	7.42	1.876857	1.463023
0.5	385200	208.2	10.1	7.07	1.737746	1.534757

Source: made by J. Qbaily

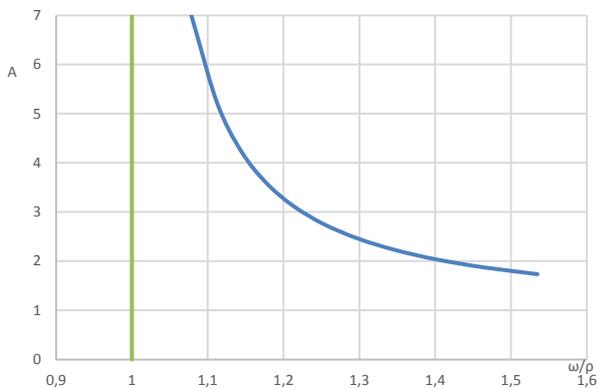


Рис. 13. Амплитудно-частотная характеристика
Источники: выполнено Д. Кбейли
Figure 13. Amplitude-frequency response
Source: made by J. Qbaily

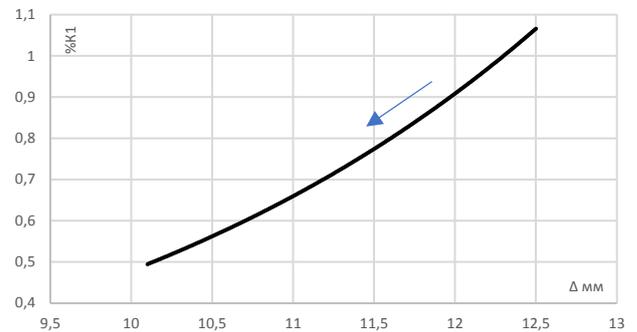


Рис. 14. Отношение поперечной силы в основании с жесткостью виброизоляторов
Источники: выполнено Д. Кбейли
Figure 14. The ration of base shear force to the Stiffness of vibration isolators
Source: made by J. Qbaily

Изменения частот и периодов здания при изменении жесткости виброизоляторов:

$$K = 0,95K_1;$$

$$T = \begin{pmatrix} 0,102 \\ 0,247 \\ 3,288 \end{pmatrix} \text{ (с);} \quad \omega = \begin{pmatrix} 9,75 \\ 4,053 \\ 0,304 \end{pmatrix} \text{ (Гц);}$$

$$K = \begin{bmatrix} 189360,448 & -108900,678 & 15915,119 \\ -108900,678 & 131889,184 & -50397,878 \\ 15915,119 & -50397,878 & 37135,2793 \end{bmatrix};$$

$$K = 0,85K_1;$$

$$T = \begin{pmatrix} 0,108 \\ 0,25 \\ 3,471 \end{pmatrix} \text{ (с);} \quad \omega = \begin{pmatrix} 9,22 \\ 4 \\ 0,288 \end{pmatrix} \text{ (Гц);}$$

$$K = \begin{bmatrix} 59514,092 & -77177,317 & 18489,505 \\ -77177,317 & 153907,564 & -76929,832 \\ 18489,505 & -76929,832 & 58462,282 \end{bmatrix};$$

$$K = 0,7K_1;$$

$$T = \begin{pmatrix} 0,119 \\ 0,247 \\ 3,818 \end{pmatrix} \text{ (с);} \quad \omega = \begin{pmatrix} 8,36 \\ 4,05 \\ 0,261 \end{pmatrix} \text{ (Гц);}$$

$$K = \begin{bmatrix} 63070,908 & -81997,426 & 19650,426 \\ -81997,426 & 1460221,439 & -78444,333 \\ 19650,426 & -78444,333 & 58825,381 \end{bmatrix};$$

$$K = 0,5K_1;$$

$$T = \begin{pmatrix} 0,141 \\ 0,248 \\ 4,658 \end{pmatrix} \text{ (с);} \quad \omega = \begin{pmatrix} 7,07 \\ 4,03 \\ 0,214 \end{pmatrix} \text{ (Гц);}$$

$$K = \begin{bmatrix} 62747,122 & -81898,883 & 19636,348 \\ -81898,883 & 160191,447 & -78440,048 \\ 19636,348 & -78440,048 & 58824,769 \end{bmatrix}.$$

Результаты расчета, когда система виброизоляторов выключена, отображены в табл. 2.

Результаты численного моделирования при выключении системы виброизоляторов
The results of numerical modeling studies when the vibration isolator system is turned off

$\% K_1$	Поперечная сила в основании S , кН / Shear force at the base S , kN	Перемещение верха сооружения Δ_{top} , мм / Displacement of the top of the structure Δ_{top} , mm
Без связи / Without connection	420	24,68

Источник: выполнено Д. Кбейли
Source: made by J. Qbaily

Отключение или разрушение дополнительных связей в процессе колебаний могут вызвать значительные изменения динамических свойств здания и, как следствие, изменения значений и распределения сейсмических сил.

Включающиеся связи могут уменьшать перемещение до 40 % и поперечную силу в основании до 49 % при значении жесткости 50 % K_1 .

5. Заключение

1. Разработан алгоритм расчета виброизолирующей системы с учетом изменения динамических характеристик конструкции (матрицы жесткости или податливости), собственных частот и форм колебаний во время колебаний.

2. Полученные зависимости и алгоритмы основаны на оценке отключения или разрушения дополнительных связей (элементы с нелинейными характеристиками) при определении сейсмических сил и перемещений сооружений при сейсмическом воздействии.

3. Рассмотрена виброизолированная система здания с нелинейными характеристиками при кинематическом воздействии. Результаты расчета показали, что амплитудно-частотная характеристика снизилась на 30 %, поперечная сила в основании снизилась на 49 % при значении жесткости виброизоляторов 50 % K_1 .

References / Список литературы

- Chernov Yu.T. *Vibrations of building structures*. 2nd ed. Moscow: ACB Publ.; 2011. (In Russ.) EDN: QNPJJR
Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. 2-е изд. М.: Изд-во АСВ, 2011. 384 с. EDN: QNPJJR
- Moroni M., Sarrazin M., Soto P. Behavior of instrumented base-isolated structures during the 27 February 2010 Chile Earthquake. *Earthquake Spectra*. 2012;28(1):407–427. <https://doi.org/10.1193/1.4000041>
- Nimmy T., Sruthy S., Mini K.M. Vibration isolation at the level of footing using modified concrete. *Materials Today: Proceedings. International Conference AMMA 2018, India*, 2020;24(2):1090–1099. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.422>
- Astroza R., Conte J.P., Restrepo J.I., Ebrahimian H., Hutchinson T. Seismic response analysis and modal identification of a full-scale five-story base-isolated building tested on the NEES@UCSD shake table. *Engineering Structures*. 2021; 238(9):112087. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112087>
- Burtseva J.A., Tkachev A.N., Chipko S.A. Roller seismic impact oscillation neutralization system for high-rise buildings. *Procedia Engineering*. 2015;129:259–265. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.046>
- Dhanya J.S., Boominathan A., Banerjee S. Response of low-rise building with geotechnical seismic isolation system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020;136:106187. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106187>
- Chernov Yu.T., Qbaily J. Accounting for horizontal torsional vibrations of foundations when calculating seismic load. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2021;31(4):66–78. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-66-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-66-78)
Чернов Ю.Т., Кбейли Д. Учет горизонтально-вращательных колебаний фундаментов при вычислении сейсмических сил // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Т. 31. № 4. С. 66–78. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-66-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-66-78)
- Chernov Yu.T., Qbaily J. Evaluation of seismic forces under modified structural schemes in the process of vibrations. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(4):391–403. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-391-40>

Чернов Ю.Т., Кбейли Д. Оценка сейсмических сил при измененных в процессе колебаний конструктивных схемах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 4. С. 391–403. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-391-403>

9. Qbaily J., Jazzan M., Chernov Y., Markovich A.S. Evaluation of the Changes in the Structure's Dynamic Properties on the Seismic Forces During the Vibration Process. *Proceedings of the International conference on engineering research (ICER 2021), Moscow, Russia.* 2022;2559(1):050015. <https://doi.org/10.1063/5.0099028>

10. Moroni M., Sarrazin M., Soto P. Behavior of instrumented base-isolated structures during the 27 February 2010 Chile Earthquake. *Earthquake Spectra.* 2012;28(1):407–427. <https://doi.org/10.1193/1.4000041>

11. Celebi M. Successful performance of a base-isolated hospital building during the 17 January 1994 Northridge earthquake. *Structural Design of Tall Buildings.* 1996;5(2):95–109 [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1794\(199606\)5:2<95::AID-TAL71>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1794(199606)5:2<95::AID-TAL71>3.0.CO;2-7)

12. Burtseva O., Chipko S., Abuladze N. Passiv system of high-rise building vibrocompensation. *Earthquake engineering. Constructions safety.* 2017;(5):59–63. (In Russ.) EDN: ZWOONL

Бурцева О.А., Чипко С.А., Абуладзе Н.Р. Пассивная система виброкомпенсации высотного сооружения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 5. С. 59–63. EDN: ZWOONL

13. Kasai K., Mita A., Kitamura H., Matsuda K., Morgan T.A., Taylor A.W. Performance of seismic protection technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Earthquake Spectra.* 2013;29(1):265–293. <https://doi.org/10.1193/1.4000131>

14. Boominathan A. Innovative Geotechnical Solutions for Base Isolation of Buildings. *Indian Geotechnical Journal.* 2014;54:3–39. <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00771-y>

15. Chernov Yu.T., Qbaily J.A. The analysis of a structure subjected to seismic action, taking into account the change in the structure's design in the vibration process. *Earthquake engineering. Constructions safety.* 2020;(3):19–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2020-3-19-30>

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