

Строительная механика Construction mechanics

Научная статья
УДК 624.04 + 004.942
DOI: 10.14529/build240303

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ВИБРАЦИИ

И.А. Пушкарев, pia10no@mail.ru

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Ижевск, Россия*

Аннотация. В данной работе приведена математическая модель колебаний плиты перекрытия с несколькими устройствами с вращающимися массами, вызывающими колебательные процессы. Уравнения Лагранжа 2-го рода лежат в основе математической модели перемещений связанных между собой твердых тел. Аналитическое решение выполняется при допущении, что угловые скорости источников вибрации постоянны. Колебания плиты перекрытия складываются из трех составляющих: затухающего колебания и двух вынужденных колебаний. Результаты наглядно представлены на примере колебаний двутавровой балки длиной 3 м с несколькими источниками вибрации с неуравновешенными массами. Выяснено, что в некоторых случаях прогибы могут превышать допустимые значения. Выведена схематичная структура строительных конструкций с перемещающимися массами и устройствами снижения колебательного влияния. Используя данную структурную модель, можно детально отобразить конструкцию в общих чертах, не принимая во внимание внутреннее наполнение строительной конструкции. Из эмпирического опыта можно сделать заключение, что различные причины вибраций возможно отобразить как конструкцию с перемещающимися массами. Вопрос анализа воздействия перемещающихся масс на динамические свойства объектов является актуальным, что следует из полученных результатов. Особое внимание следует уделить одновременному воздействию нескольких источников вибрации.

Ключевые слова: строительная механика, вибрация, строительные конструкции, подвижные нагрузки, математическая модель, частота колебаний

Для цитирования. Пушкарев И.А. Анализ колебаний плиты перекрытия с двумя источниками вибрации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 3. С. 24–32. DOI: 10.14529/build240303

Original article
DOI: 10.14529/build240303

THE ANALYSIS OF VIBRATIONS IN A FLOOR PLATE WITH TWO SOURCES OF VIBRATION

I.A. Pushkarev, pia10no@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Abstract. This article presents a mathematical model of vibrations in a floor slab with two sources of vibration (rotors with unbalanced masses). The equations of the motion of a system of bodies are obtained using Lagrange equations of the second kind. An analytical solution to the system of differential equations is obtained under the assumption that the angular velocities of the vibration sources are constant. The vibrations of the floor slab consist of three components: a damped vibration, which has its own frequency, but is caused by the action of driving forces, and two forced vibrations. The results are presented using the example of vibrations of a 3 m long I-beam with several vibration sources with unbalanced masses. It was found that in some cases deflections may exceed permissible values. A structural model of systems with moving loads and vibration protection has been constructed, which visually represents the object under consideration, abstracting from its specific content. As practice shows, all kinds of vibration sources can be represented by a system with moving loads. The results of the study indicate the relevance of a more in-depth study of the influence of moving loads on the dynamics of building structures and the development of special vibration

protection measures during the design, construction, and operation of buildings. Particular attention should be paid to simultaneous exposure to multiple vibration sources.

Keywords: structural mechanics, vibration, building structures, moving loads, mathematical model, vibration frequency

For citation. Pushkarev I.A. The analysis of vibrations in a floor plate with two sources of vibration. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(3):24–32. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240303

Введение

Строительные конструкции подвержены воздействию большого спектра различных вибрационных воздействий, но неизвестна зависимость между числом источников и их суммарным влиянием на строительные конструкции. Нормативные документы предписывают использование различных устройств виброзащиты [1]. Предельно допустимые значения виброскоростей и уровня вибрации также устанавливаются в зависимости от типа и назначения проектируемого объекта [2].

Среди работ, посвященных анализу систем с перемещающимися массами, можно отметить работы [3, 4], в которых дан анализ строительных конструкций с подвижными нагрузками. Получены собственные частоты и формы колебаний. В работе [5] приведен численный анализ балки Бернулли – Эйлера на вязкоупругом основании под воздействием подвижной нагрузки. Нелинейность при анализе стальных и железобетонных балок с подвижными нагрузками учитывается в методике, описанной в [6]. Динамические реакции от действия подвижной нагрузки анализируются в работе [7].

В работе [8] исследуются конструктивно-нелинейные колебания железобетонного каркаса, рассмотрены математические модели колебаний, а также порядок расчета системы при разрушении одного из элементов конструкции.

Среди работ, опубликованных за рубежом, можно отметить работы [9, 10], где приведен анализ по изучению вязкоупругих балок с перемещающейся сосредоточенной нагрузкой. Приведены зависимости для собственных частот в широком диапазоне скоростей. В статье [11] рассматривается устойчивость здания при комбинированной вибрации в зданиях экспериментальным путем. Работа [12] посвящена анализу свободных и вынужденных колебаний каркаса 2-этажного дома с трещинами.

Цель работы – провести анализ воздействия нескольких вибрационных факторов на строительную конструкцию, опираясь на математический аппарат, с целью разработки защитных мер при проектировании строительных конструкций.

Схематичная структура объекта с перемещающимися массами

Упрощенные схемы и модели являются неотъемлемой частью анализа строительных объектов. Принципы структурирования и выявления

функций системы на основе различных подходов даны в работе [13]. Предлагается разделить виды систем защиты от негативных факторов вибрационного характера, действующих на строительные конструкции, на неразрывно связанную с объектов и дополнительную. Так, например, стены и фундаменты зданий большой этажности можно рассматривать как демпфер настроенной массы или сейсмический демпфер [14, 15]. В качестве специальных методов защиты зданий от воздействия вибрации и шума от городского транспорта используются резинометаллические виброизоляторы, шумозащитные экраны, а также принципиально новые типы виброзащитных устройств, используемые также для повышения надежности конструкций, – магнитореологические демпферы [16–18].

В работе [19] анализируется применение динамических гасителей колебаний для смягчения воздействия значительных сейсмических сил. Исследование [20] посвящено анализу новых демпфирующих систем, рассеивающих энергию колебаний. В работе [21] представлены возможные изменения, которые снижают ударное и сейсмическое влияние за счет проектирования систем по гашению энергии с целью недопущения распространения импульсного воздействия. В работе [22] приведены методы защиты от землетрясений, основанные на использовании материалов из отходов резинового грунта. В работе [23] показан метод определения сейсмического воздействия на структурные элементы в многоэтажных зданиях.

Схематичная структура объекта с перемещающимися массами и системой защиты от вибрационных воздействий различного характера показана на рис. 1.

Метод исследования

Схематичное изображение строительной конструкции с количеством источников, которое равно двум, приведено на рис. 2. Источниками вибрации являются в общем случае роторы с неуравновешенными массами, например, насосы и вентиляторы систем теплоснабжения и вентиляции.

Рассмотрим наиболее опасный динамический случай, когда на строительную конструкцию воздействует одновременно несколько источников вибрации. В случае двух источников – это совокупность тел, каждое из которых имеет три степе-



Рис. 1. Структура систем с подвижными нагрузками и защитой от вибраций

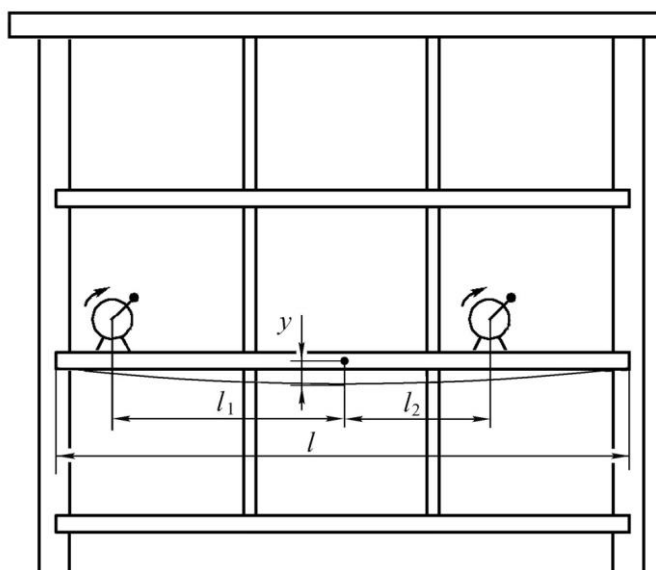


Рис. 2. Модель здания с двумя источниками вибрации

ни свободы. Обобщенные координаты: углы поворота вращающихся элементов источников вибрации φ_1 и φ_2 – углы поворота роторов и смещение горизонтального элемента конструкции (балки) y от положения равновесия.

Математическая модель основана на уравнениях Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1}; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = Q_{\varphi_2};$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y,$$

где T – кинетическая энергия системы, $\varphi_1, \varphi_2, \dot{y}$ – обобщенные скорости, Q – обобщенные силы.

Обобщенные силы включают в себя моменты приводов электромоторов M_1, M_2 , силы тяжести, силы упругости и демпфирования балки: $m_i g, F_{упр}$ и $F_{демп} = -\mu \dot{y}$ (здесь μ – коэффициент сопротивления). Кинетическая энергия складывается

из кинетических энергий грузов, источников вибрации и горизонтального элемента конструкции.

Дифференциальные уравнения движения системы будут иметь стандартный вид:

$$\ddot{\varphi}_1 R_1^2 (m_1 + 0,5m_4) + \ddot{y} R_1 \xi_1 m_1 \cos \varphi_1 = M_1 - m_1 g \cos \varphi_1 R_1;$$

$$\ddot{\varphi}_2 R_2^2 (m_2 + 0,5m_5) + \ddot{y} R_2 \xi_2 m_2 \cos \varphi_2 = M_2 - m_2 g \cos \varphi_2 R_2,$$

где R_1, R_2 – длины, равные расстоянию между центрами вращения источников вибрации и грузами; $\xi_1 = \ddot{y}_1 / \dot{y}$ и $\xi_2 = \ddot{y}_2 / \dot{y}$ – коэффициенты, с помощью которых принимается во внимание расположение источников вибрации и грузов, m_1, m_2 – массы неуравновешенных грузов; m_3 – масса горизонтального элемента конструкции (балки); m_4, m_5 – массы и моменты источников вибрации.

С целью получения численного решения вводим допущение, что угловые скорости источников вибрации ω_1 и ω_2 равны константе, следовательно, $\ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 = 0$.

Если статическое равновесие горизонтального элемента конструкции является началом отсчета, то уравнение вынужденных колебаний балки будет иметь вид

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + k^2 y = B \sin \varphi_1 + D \sin \varphi_2, \quad (1)$$

где $B = \dot{\varphi}_1^2 R_1 v_1 m_1 / m_{\text{пр}}$; $D = \dot{\varphi}_2^2 R_2 v_2 m_2 / m_{\text{пр}}$;

$m_{\text{пр}} = \xi_1^2 (m_1 + m_4) + \xi_2^2 (m_2 + m_5) + \kappa m_3$ – приведенная масса.

Пропорциональность n и k (затухающий или апериодический процесс) является основой общего и частного решения. Так, при $n < k$ общее решение однородного уравнения будет иметь вид

$$y_1 = e^{-nt} (C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t), \quad (2)$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$.

Частное решение будем искать в виде

$$y_2 = b \sin(\omega_1 t + \gamma_1) + d \sin(\omega_2 t + \gamma_2), \quad (3)$$

где b, d, γ_1, γ_2 – неопределенные постоянные величины.

Запишем в скобках однородного уравнения (2) в виде

$$C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t = A \sin(k_1 t + \alpha) = A(\sin k_1 t \cos \alpha + \cos k_1 t \sin \alpha),$$

где A – амплитуда вынужденных колебаний.

Приравнявая коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях, получаем

$$C_1 = A \cos \alpha; \quad C_2 = A \sin \alpha; \quad \frac{C_2}{C_1} = \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\text{откуда } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{C_2}{C_1}.$$

Окончательно записываем общее решение дифференциального уравнения (1) в виде

$$y = A e^{-nt} \sin(k_1 t + \alpha) + b \sin(\omega_1 t + \gamma_1) + d \sin(\omega_2 t + \gamma_2). \quad (4)$$

Таким образом, колебания балки складываются: из вынужденных затухающих колебаний (первое слагаемое) и колебаний, вызванных действием вынуждающей силы (второе и третье слагаемое).

Результаты и обсуждения

Исследуются вынужденные колебания балки № 30 (ГОСТ 8239-89) сечением $F = 46,5 \text{ см}^2$ под воздействие двух источников вибрации – роторов с неуравновешенными массами. Расчет на основе полученных уравнений выполнен для следующих условий: $m_1 = 3 \text{ кг}$; $m_2 = 4 \text{ кг}$; $m_4 = 80 \text{ кг}$; $m_5 = 109 \text{ кг}$; $R_1 = 0,3 \text{ м}$; $R_2 = 0,4 \text{ м}$; $l_1 = l_2 = 1 \text{ м}$ (см. рис. 2), соответственно, $\xi_1 = \xi_2 = 0,56$; $\dot{\varphi}_1 = \omega_1 = 100 \text{ рад}$, $n = 0,1k$.

Частота колебаний стальной двутавровой балки № 30 (ГОСТ 8239-89) сечением $F = 46,5 \text{ см}^2$ была найдена по формуле

$$k = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EJ}{F\rho}}, \quad (5)$$

где $J = J_x = 7080 \text{ см}^4$ – момент инерции сечения; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости стали; $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали.

Таким образом, для балки длиной $l = 6 \text{ м}$ собственная частота колебаний составляет

$$k = \frac{\pi}{2 \cdot 6^2} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 7080 \cdot 10^{-8}}{46,5 \cdot 10^{-4} \cdot 7800}} = 27,53 \text{ с}^{-1},$$

ее масса $m_3 = 36,5 \cdot 6 = 219 \text{ кг}$;

для балки длиной $l = 3 \text{ м}$

$$k = \frac{\pi}{2 \cdot 3^2} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 7080 \cdot 10^{-8}}{46,5 \cdot 10^{-4} \cdot 7800}} = 110,12 \text{ с}^{-1},$$

ее масса $m_3 = 36,5 \cdot 3 = 109 \text{ кг}$.

Результаты расчетов показаны на рис. 3 и рис. 4 для балок длиной $l = 6 \text{ м}$ и $l = 3 \text{ м}$ при различных соотношениях ω_1 и ω_2 .

При сравнении полученных прогибов двутавровой балки № 30 сечением $F = 46,5 \text{ см}^2$ и допустимого значения, равного $l/250 = 0,012 \text{ м}$ (согласно [24]), результаты следующие:

1) балка длиной $l = 6 \text{ м}$, $\omega_1/\omega_2 = 1$, $\delta = 0,0083 \text{ м} < 0,024 \text{ м}$;

2) балка длиной $l = 6 \text{ м}$, $\omega_1/\omega_2 = 2$, $\delta = 0,0072 \text{ м} < 0,024 \text{ м}$;

3) балка длиной $l = 3 \text{ м}$, $\omega_1/\omega_2 = 1$, $\delta = 0,0539 \text{ м} > 0,012 \text{ м}$;

4) балка длиной $l = 3 \text{ м}$, $\omega_1/\omega_2 = 2$, $\delta = 0,0225 \text{ м} > 0,012 \text{ м}$.

В третьем случае значение превышает допустимые значения в 4,492 раза, в четвертом – в 1,875 раза.

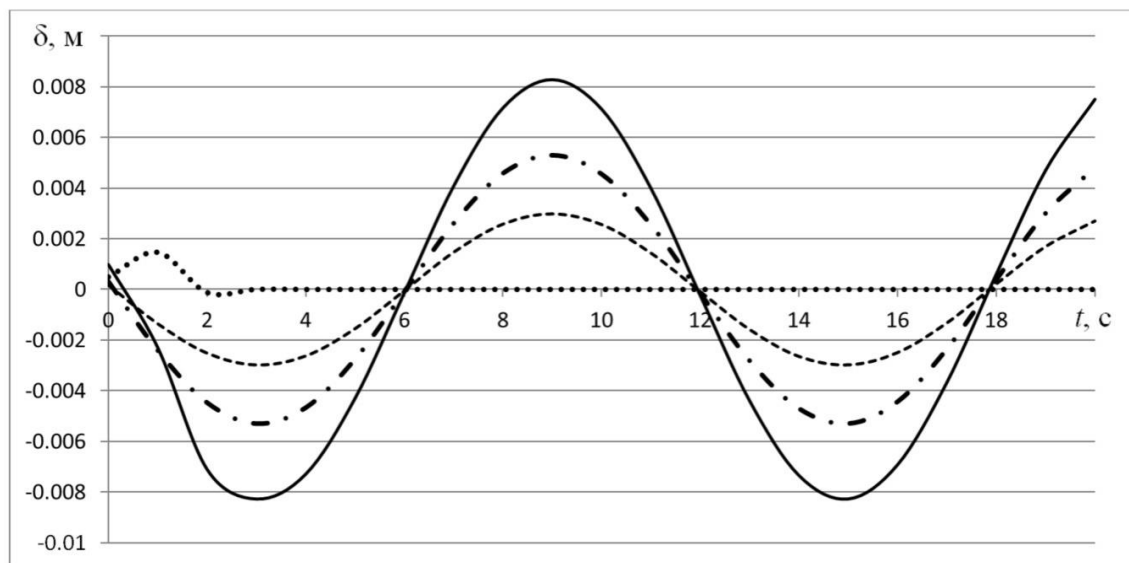
Построены амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний балки перекрытия длиной 3 м с двумя источниками вибрации (рис. 5) по формулам:

$$b = \frac{B}{\sqrt{(k^2 - \omega_1^2)^2 + 4n^2 \omega_1^2}}; \quad (6)$$

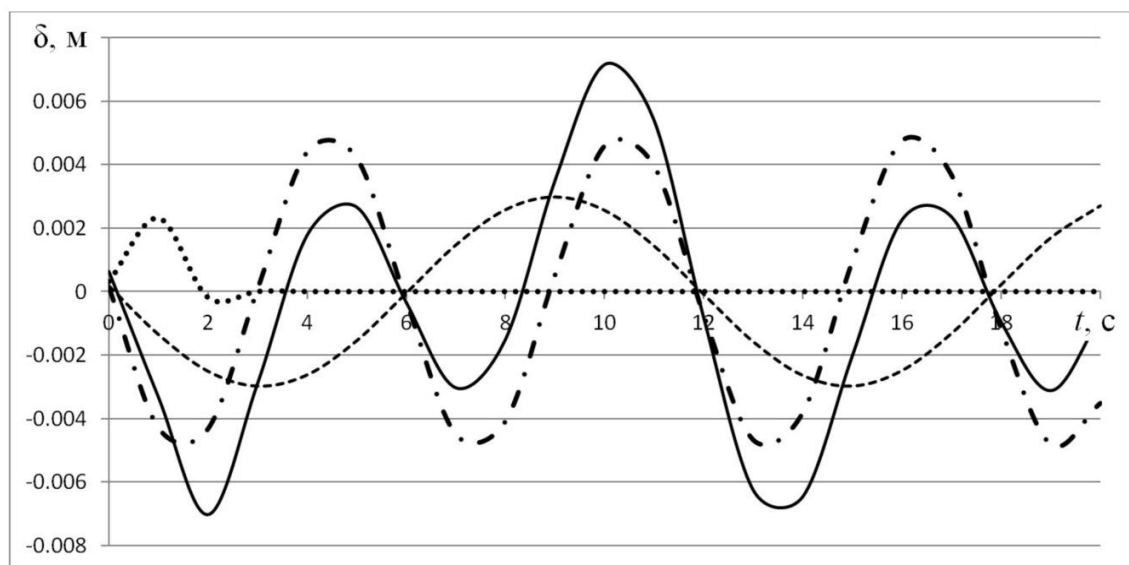
$$d = \frac{D}{\sqrt{(k^2 - \omega_2^2)^2 + 4n^2 \omega_2^2}};$$

$$H = b + d.$$

Максимальная резонансная частота двутавровой балки № 30 длиной 3 м при частоте $\omega = 110 \text{ рад/с}$ составляет $H = 0,0573 \text{ м}$, что превышает допустимое значение $l/250 = 0,012 \text{ м}$ в 4,775 раза. Резонансная частота меньше рабочей частоты оборудования (насосов и вентиляторов). При включении оборудования при набирании оборотов роторы пройдут эту частоту, следовательно, резонанс неизбежен.



а)



б)

Рис. 3. Колебания двутавровой балки № 30 (ГОСТ 8239-89) длиной 6 м при воздействии двух источников вибрации: а – $\omega_1/\omega_2 = 1$; б – $\omega_1/\omega_2 = 2$

$$\begin{aligned} \dots\dots y &= Ae^{-nt} \sin(k_1t + \alpha); \quad \text{-----} y = b \sin(\omega_1t + \gamma_1); \quad \text{-}\cdot\text{-}\cdot\text{-}\cdot\text{-}\cdot\text{-} y = d \sin(\omega_2t + \gamma_2); \\ \text{————} y &= Ae^{-nt} \sin(k_1t + \alpha) + b \sin(\omega_1t + \gamma_1) + d \sin(\omega_2t + \gamma_2) \end{aligned}$$

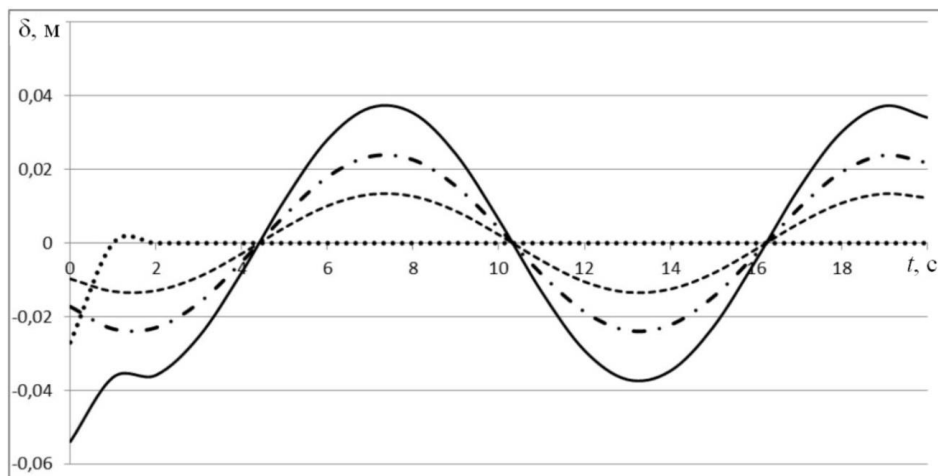
Выводы

1. Схематичная структура объекта с перемещающимися массами составлена на основе обзора источников по данному вопросу и позволяет детально отобразить конструкцию в общих чертах, не принимая во внимание внутреннее наполнение строительной конструкции.

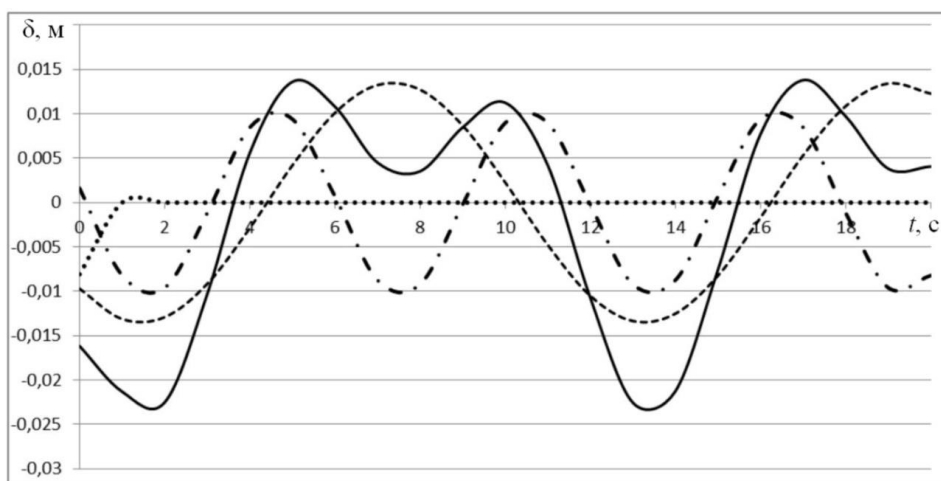
2. Составлены дифференциальные уравнения колебаний горизонтального элемента

конструкции с несколькими с вращающимися массами, вызывающими колебательные процессы.

3. Аналитическое решение получено при следующем допущении: угловые скорости вращающихся источников вибрации равны константе. Колебания горизонтального элемента конструкции состоят из затухающего колебания и двух вынужденных.



а)



б)

Рис. 4. Колебания двутавровой балки № 30 (ГОСТ 8239-89) длиной 3 м при воздействии двух источников вибрации: а – $\omega_1/\omega_2 = 1$; б – $\omega_1/\omega_2 = 2$
 $y = Ae^{-nt} \sin(k_1t + \alpha)$; - - - - $y = b \sin(\omega_1t + \gamma_1)$; - · - · - · $y = d \sin(\omega_2t + \gamma_2)$;
 — $y = Ae^{-nt} \sin(k_1t + \alpha) + b \sin(\omega_1t + \gamma_1) + d \sin(\omega_2t + \gamma_2)$

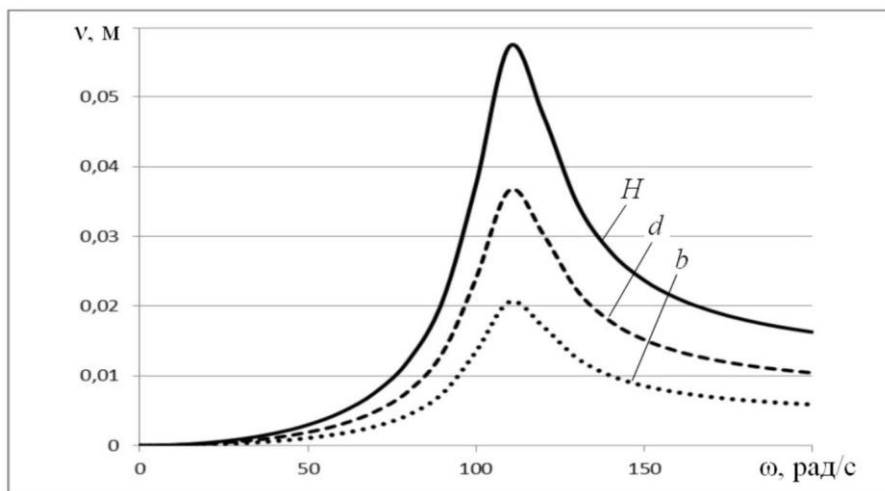


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний двутавровой балки длиной 3 м при воздействии двух источников вибрации

4. Произведен расчет колебаний двутавровой балки № 30 (ГОСТ 8239-89) длиной $l = 3$ м при неуравновешенных массах $m_1 = 3$ кг; $m_2 = 4$ кг; эксцентриситетах $R_1 = 0,3$ м; $R_2 = 0,4$ м; угловой скорости роторов от 100 до 200 рад/с. В результате расчетов выяснено, что в некоторых случаях прогибы могут превышать допустимые значения при действии двух источников вибрации.

5. Построены амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний балки перекры-

тия с двумя источниками вибрации. Результаты показали, что на резонансной частоте прогибы превышают допустимые значения.

Таким образом, анализ воздействия перемещающихся масс на динамические свойства объектов свидетельствует о том, что требуется тщательное изучение перемещающихся масс на динамику объектов строительства. Особое внимание следует уделить одновременному воздействию нескольких источников вибрации.

Список литературы

1. ГОСТ 12.1.012–2004. Вибрационная безопасность. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2010. 23 с.
2. ГОСТ 26568–85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 17 с.
3. Костеннов Т.В. Применение методов системного анализа к построению структурно-функциональной схемы тепличной системы // Математические структуры и моделирование. 2022. № 3 (63). С. 69–78. DOI: 10.24147/2222-8772.2022.3.69-78.
4. Антоненко М.В., Иванкина О.П. Расчет мостовых сооружений на действие подвижной нагрузки // Новые технологии в учебном процессе и производстве: материалы XVIII Международной научно-технической конференции, 17–19 апреля 2019 г. Рязань, 2020. С. 153–155.
5. Иманалиев Т.О. Расчет собственных частот и форм колебаний инженерных сооружений от подвижной нагрузки // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2019. № 4 (66). С. 571–576. DOI: 10.35803/1694-5298.2019.4.571-576. (In Russ.).
6. Шитикова М.В., Мондрус В.Л., Гарбер Е.О. Численный анализ балки Бернулли – Эйлера на вязкоупругом основании под воздействием подвижной нагрузки // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: Тезисы докладов VIII международного симпозиума, 17–21 мая 2023 года. Тамбов. 2023. С. 193–194.
7. Аверин А.Н. Расчет неразрезных тонкостенных сталежелезобетонных балок на подвижную нагрузку с учетом конструктивной нелинейности // Строительная механика и конструкции. 2021. № 1(28). С. 45–54. (In Russ.).
8. Дербенцев И.С., Потапов А.Н., Созыкина Е.С. Анализ конструктивно-нелинейных колебаний железобетонного каркаса // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 4. С. 5–18. DOI: 10.14529/build230401.
9. Зылев В.Б., Алферов И.В. Динамические опорные реакции в двухпролетной мостовой ферме при действии подвижной нагрузки // Строительство и реконструкция. 2019. № 2 (82). С. 20–25. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-20-25.
10. Praharaj R., Datta N. Dynamic response spectra of fractionally damped viscoelastic beams subjected to moving load. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020. DOI: 10.1080/15397734.2020.1725563.
11. Matsuda T., R. Tomita. Examination of evaluation method on vibration sense for combined vibration in building // *Journal of Environmental Engineering (Japan)*. 2022. Vol. 87, No. 796. P. 324–334. DOI: 10.3130/aije.87.324.
12. Hùng D. Th. Analysis of free and forced vibrations in the two-storey building frame with cracks // *Khoa học và Công Nghệ*. 2023. Vol. 228, No. 06. P. 85–92. DOI: 10.34238/tnu-jst.7732.
13. Степанов Л.В., Серебрякова Е.А. Сравнительный анализ структурно-функционального и процессного подходов к моделированию систем // Общество и экономическая мысль в XXI в.: пути развития и инновации: материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию филиала, 31 марта 2021 г. Воронеж: Научная книга, 2021. С. 569–574.
14. Жаданова В.А., Леонова А.Н., Гугулян А.А. Сейсмозащитные мероприятия при строительстве высотных зданий // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2020. № 4. С. 250–253.
15. Etedali S., Akbari M., Seifi M. Friction Tuned Mass Dampers in Seismic-Excited High-Rise Buildings with SSI Effects: A Reliability Assessment // *Journal of Earthquake and Tsunami*. 2023. Vol. 17. № 02. DOI: 10.1142/s1793431122500221.
16. Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Квасников Т.М. Резинометаллические виброизоляторы с отверстиями в системе виброзащиты зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 8. С. 70–75. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.08.70-75.

17. Геппель С.А. Защита жилых зданий от внешних источников шума специальными шумозащитными конструкциями // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12 (84). С. 382–391.
18. Ермолаев А.И., Пановко Г.Я., Плехов А.С., Тишин И.В. Расчет магнитореологического демпфера для защиты опор и арматуры воздушных линий электропередачи // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 3. С. 103–111.
19. Pan W., Wang Z., Zhang Y. Novel discrete diaphragm system of concrete high-rise modular buildings. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 51. P. 104342. DOI: 10.1016/j.job.2022.104342.
20. Шеин, А.И., Чуманов А.В., Мальков А.И. Новые гасители колебаний зданий и сооружений // Моделирование и механика конструкций. 2021. № 13. С. 10–25.
21. Brysin A.N., Solovyev V.C., Mikayeva S.A., Nikiforov A.N. Seismic and shock effects reduction by vibration protection systems equipped with amplifiers of inertial characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 01–05 Oktober 2019. Vol. 698 (2). Kislovodsk: Institute of Physics Publishing. 2019. P. 022049. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022049.
22. Dutta S., Nanda R.P. Waste Rubber–Soil Mat for Protection of Structures from Earthquake-Induced Liquefaction // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2022. V. 8. №. 5. P. 1–8. DOI: 10.1007/s40891-022-00397-9.
23. Pkhovelishvili M.G., Archvadze N.N., Nikoleishvili M.M. Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model // *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2023. Vol. 13. № 1. P. 162–172. DOI: 10.46698/VNC.2023.61.18.012.
24. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. М.: Стандартиформ, 2017. 85 с.

References

1. *GOST 12.1.012–2004. Vibratsionnaya bezopasnost'. Obshchiye trebovaniya.* [GOST 12.1.012–2004. Vibration safety. General requirements]. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. 23 p. (in Russ.)
2. *GOST 26568–85. Vibratsiya. Metody i sredstva zashchity. Klassifikatsiya.* [GOST 26568–85. Vibration. Methods and means of protection. Classification]. Moscow: USSR State Committee for Standards Publ.; 1985. 17 p. (in Russ.)
3. Kostenov T.V. Application of methods of system analysis to the construction of a structural and functional scheme of a greenhouse system. *Mathematical structures and modeling*. 2022;3(63):69–78. (in Russ.) DOI: 10.24147/2222-8772.2022.3.69-78.
4. Antonenko M.V., Ivankina O.P. [Calculation of bridge structures under the action of a moving load]. In: *Novyye tekhnologii v uchebnoy protsesse i proizvodstve: Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Ryazan', 17–19 aprelya 2019 goda).* [New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference (Ryazan, April 17–19, 2019)]. Ryazan: 2020;153–155. (in Russ.)
5. Imanaliev T.O. Calculation of natural frequencies and vibration modes of engineering structures. *The herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N. Isanov*. 2019;4(66):571–576. (in Russ.) DOI: 10.35803/1694-5298.2019.4.571-576.
6. Shitikova M.V., Mondrus V.L., Garber E.O. Numerical analysis of euler-bernoulli beam on viscoelastic foundation under moving load. In: *Aktual'nyye problemy modelirovaniya konstruksiy i sooruzheniy: komp'yuternyye tezisy dokladov VIII mezhdunarodnogo simpoziuma (Tambov, 17–21 maya 2023 goda).* [Current problems of computer modeling of structures and structures: Abstracts of the VIII International Symposium (Tambob, May 17–21, 2023)]. Tambob: IP Chesnokova A.V., 2023;193–194. (in Russ.)
7. Averin A.N. Calculation of non-cut thin-walled steel-reinforced concrete beams for a moving load taking into account constructive nonlinearity. *Structural mechanics and structures*. 2021;1(28):45–54. (in Russ.)
8. Derbentsev I.S., Potapov A.N., Sozykina E.S. Analysis of structural-nonlinear vibrations of reinforced concrete frame. *Bulletin of south ural state university. series: construction engineering and architecture*. 2023;23(4):5–18. (in Russ.) DOI: 10.14529/build230401.
9. Zylev V.B., Alferov I.V. Study of the dynamic support reactions in the two-span bridge farm under action of moving load. *Building and reconstruction*. 2019;2(82):20–25. (in Russ.) DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-20-25.
10. Praharaj R., Datta N. Dynamic response spectrum of fractionally damped viscoelastic beams subject to moving load. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020. DOI: 10.1080/15397734.2020.1725563.
11. Matsuda T., Tomita R. Examination of evaluation method on vibration sense for combined vibration in building. *Journal of Environmental Engineering (Japan)*. 2022;87(796):324–334. DOI 10.3130/aije.87.324.
12. Hùng, D. Th. Analysis of free and forced vibrations in the two-storey building frame with cracks. *Khoa học và Công Nghệ*. 2023;228(6):85–92. DOI 10.34238/tnu-jst.7732.

13. Stepanov L.V., Serebryakova E.A. [Comparative analysis of structural-functional and process approaches to system modeling]. In: *Obshchestvo i ekonomicheskaya mysl' v XXI v.: puti razvitiya i innovatsiy : materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 65-letnemu yubileyu filiala (Voronezh, 31 marta 2021 goda)*. [Society and economic thought in the 21st century: paths of development and innovation: materials of the IX International scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the branch (Voronezh, March 31, 2021)]. Voronezh: Scientific book. 2021;569–574. (in Russ.)
14. Zhadanova V.A., Leonova A.N., Gugulyan A.A. Seismological protection measures during the construction of high rise buildings. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiy vestnik)*. [Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin)]. 2020;4:250–253. (in Russ.)
15. Etedali S., Akbari M., Seifi M. *Friction Tuned Mass Dampers in Seismic-Excited High-Rise Buildings with SSI Effects: A Reliability Assessment*. Journal of Earthquake and Tsunami. 2023;17(2). DOI: 10.1142/s1793431122500221.
16. Mondrus V.L., Sizov D.K., Kvasnikov T.M. Rubber-metal vibration isolators with holes in the vibration protection system of buildings. *Industrial and civil engineering*. 2023;8:70–75. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.08.70–75. (in Russ.)
17. Geppel S.A. Protection of residential buildings from external noise sources by special noise-proof structures. *Engineering journal of Don*. 2021;12(84):382–391.
18. Ermolaev A.I., Panovko G.Ya., Plekhov A.S., Tishin I.V. Calculation of a magnetorheological damper for protection the overhead line units. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022;3:103–111. (in Russ.)
19. Pan W., Wang Z., Zhang Y. Novel Discrete Diaphragm System of Concrete High-Rise Modular Buildings. *Journal of Building Engineering*. 2022;51: 104342. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104342.
20. Shein, A.I., Chumanov A.V., Malkov A.I. [New vibration dampers for buildings and structures]. *Modelirovaniye i mekhanika konstruktsiy* [Modeling and mechanics of structures]. 2021;13:10–25. (in Russ.)
21. Brysin A.N., Solovyev V.C., Mikayeva S.A., Nikiforov A.N. [Seismic and shock effects reduction by vibration protection systems equipped with amplifiers of inertial characteristics]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kislovodsk: Institute of Physics Publishing 2019:022049. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022049.
22. Dutta S., Nanda R.P. Waste Rubber–Soil Mat for Protection of Structures from Earthquake-Induced Liquefaction. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2022;8(5):1–8. DOI: 10.1007/s40891-022-00397-9.
23. Pkhovelishvili M.G., Archvadze N.N., Nikoleishvili M.M. Analysis of earthquake prediction models to obtain the best model. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2023; 13 (1): 162–172. DOI: 10.46698/VNC.2023.61.18.012.
24. *SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya*. [Set of Rules 20.13330.2016. Loads and impacts]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 95 p. (in Russ.)

Информация об авторе:

Пушкарев Иван Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия; pial0no@mail.ru

Information about the author:

Ivan A. Pushkarev, PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia; pial0no@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2024, принята к публикации 25.04.2024.

The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 25.04.2024.