

УДК 550.34.09

DOI [10.37153/2618-9281.2021.6-21-28](https://doi.org/10.37153/2618-9281.2021.6-21-28)

Теоретические и экспериментальные исследования

Учет различия в возмущении опор многоопорных сооружений

Заалишвили В.Б.¹, Смирнова Л.Н.², Никонова Н.В.³, Уздин А.М.⁴

¹ ГФИ ВНИ РАН. Владикавказ, РСО-Алания, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

³ ИГУПС Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Предложены три характеристики для описания различия возмущений под опорами для аслета многоопорных конструкций. Эти характеристики включают показатель несинхронности τ_0 , показатель некогерентности ρ и показатель разномасштабности ζ . Первая характеристика показывает сдвиг возмущений по времени, вторая характеризует разницу в частотном составе возмущений, а третья – разницу в амплитудах возмущения. Для оценки показателя несинхронности предложено нахождение – максимизация корреляционной функции и минимизация нормы разности возмущений. Предложенные параметры в полной мере характеризуют задание неоднородности поля возмущений на площадке строительства. При этом они по-разному влияют на отклик системы. Небольшие отклонения показателя амплитуд возмущений ζ под опорами слабо уменьшают реакцию сооружения. Что касается некогерентности возмущений, то этот эффект может приближать или удалять систему от резонанса.

Ключевые слова: многоопорные сооружения, синхронность колебаний, корреляционная функция, показатель когерентности, показатель возбуждения амплитуд, неоднородность поля ускорений

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Смирнова Л.Н., Никонова Н.В., Уздин А.М. Учет различия в возмущении опор многоопорных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 6. С. 21–28. DOI [10.37153/2618-9281.2021.6-21-28](https://doi.org/10.37153/2618-9281.2021.6-21-28)

Вклад авторов: Заалишвили В. Б. – анализ полученных результатов и составление итоговых выводов, редактирование черновика варианта статьи, Смирнова Л. Н. – подбор и перевод иностранных источников, подробное описание, проведение теоретических исследований, подготовка окончательной редакции статьи, Никонова Н.В., – выполнение численных вычислений, составление полученных результатов, подготовка иллюстративного материала, подготовка черновой версии статьи, Уздин А. М – общее руководство работой, редактирование черновика варианта статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФ Инициатива Грант ГФЕН_а № 21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления повреждений при сейсмических воздействиях на примере портовых и шельфовых сооружений»

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© В.Б. Заалишвили, Л.Н. Смирнова, Н.В. Никонова, А.М. Уздин А.М. 2021

Theoretical and Experimental Studies

Taking into account the difference in the support excitation
for multi-supported structures

Zaalishvili V.B.¹, Smirnova L.N.², Nikonova N.V.³, Uzdin A.M.⁴

¹CFI VSC RAS. Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russian Federation

²JSC «Research center of Construction» 6-21-6 Institut'skaya st., Moscow, 109428, Russian Federation

^{3,4} St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: Three characteristics are proposed to describe the excitation differences under supports for calculating multi-supported structures. These characteristics include the non-synchronicity indicator τ_0 , the incoherence indicator ρ and the non-uniformly scaled indicator ζ . The first characteristic shows the time shift between the excitations, the second characteristic shows the difference in the excitation frequency composition, and the third one shows the difference in the action amplitudes. To estimate the nonsynchrony index, two approaches have been proposed – maximizing the correlation function and minimizing the norm of the excitation difference. The proposed parameters fully characterize the acceleration inhomogeneity field at the construction site. However, they affect the system response in different ways. Small deviations in the index of excitation amplitudes ζ weakly reduce the structure response. As for the excitation incoherence, this effect can bring the system closer or away from resonance.

Keywords: multi-support structures, non-synchronicity of excitation, correlation function, coherence index, amplitude divergence index inhomogeneity of the acceleration field

For citation: Zaalishvili V.B., Smirnova L.N., Nikonova N.V., Uzdin A.M. Taking into account the difference in the support excitation for multi-supported structures. *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 6, pp. 21-28. (In Russian) DOI: [10.37153/2618-2121-2021-6-21-28](https://doi.org/10.37153/2618-2121-2021-6-21-28)

Funding: This research was supporting on the Russian Foundation for Basic Research (grant GFEN, no. 21-58-53012 «Theoretical foundations and methods for designing scenarios of damage accumulation during seismic impacts on the example of port and offshore structures»).

При расчете многоопорных конструкций всегда вопрос различия возмущений под опорами. Вопросам расчета многоопорных конструкций посвящено много отечественных [1, 2 др.] и зарубежных [3, 4 и др.] исследований. Особенно остро этот вопрос стоит для мостов, когда береговые опоры могут характеризоваться 7-балльной сейсмичностью, а русловые – 9-балльной [5, 6]. В сейсмологии различие в колебаниях удаленных друг от друга точек дневной поверхности характеризуется корреляционной функцией $K(\tau)$ и коэффициентом корреляции ρ .

$$K(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) \varphi(t - \tau) dt \quad (1)$$

где $f(t)$ и $\varphi(t)$ – колебания на сейсмируемых точках дневной поверхности, T_0 – продолжительность землетрясения.

$$\rho = \frac{K(0)}{\|f\| \cdot \|\varphi\|} \quad (2)$$

Здесь

$$\|f\| = \sqrt{\int_0^T f(t)^2 dt} \quad (3)$$

Если разложить функцию $\varphi(t - \tau)$ в выражении (2) в ряд по степеням τ и держать первые два члена, то получим

$$K(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \left[\varphi(t) - \varphi(t)\tau - \frac{1}{2} \ddot{\varphi}(t) \tau^2 \right] dt \quad (4)$$

Отсюда получим

$$K(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \varphi(t) dt - \frac{\tau}{T} \int_0^T f(t) \dot{\varphi}(t) dt - \frac{\tau^2}{2T} \int_0^T f(t) \ddot{\varphi}(t) dt \quad (5)$$

Экстремальное значение $K(\tau)$ достигается при условии

$$\frac{dK}{d\tau} = 0 \quad (6)$$

Из (5, 6) получаем показатель неслучайности воздействий τ_0

$$\tau_0 = \frac{\int_0^T f(t) \dot{\varphi}(t) dt}{\int_0^T f(t) \ddot{\varphi}(t) dt} \quad (7)$$

При этом в качестве показателя когерентности сигнала можно принять

$$\rho = \frac{K(\tau_0)}{\|f\| \cdot \|\varphi\|} \quad (8)$$

Заметим, что показатель когерентности зависит только на различие в частоте процессов f и φ . Амплитуды процессов могут различаться. Они линейно входят в числитель и знаменатель и не влияют на величину ρ .

Для учета различий в амплитудах авторы предлагают использовать функцию и коэффициент идентичности процессов:

$$I(\tau) = \int_0^T (f(t) - \varphi(t - \tau))^2 dt \quad (9)$$

$$\chi(\tau) = \frac{I(\tau)}{2\|f\| \cdot \|\varphi\|} \quad (10)$$

Если раскрыть скобки в представлении (9), то получим

$$\chi(\tau) = \frac{1}{2} \left(\frac{\|f\|^2}{\|f\|^2} - 2 \frac{K(\tau)}{\|f\| \cdot \|\varphi\|} + \frac{\|\varphi\|^2}{\|f\|^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\|f\|}{\|\varphi\|} + \frac{\|\varphi\|}{\|f\|} \right) + K(\tau) \quad (11)$$

Раскладывая $\varphi(t - \tau)$ в ряд, аналогично тому, как это было сделано ранее, получим

$$\varphi(t - \tau) = \int_0^{\tau} \left(f(t) - \varphi(t) - \varphi(t) \frac{\tau - t}{2} \right) dt \quad (12)$$

или

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \int_0^{\tau} (f(t) - \varphi(t)) dt - 2\tau \int_0^{\tau} (f(t) - \varphi(t)) \varphi(t) dt + \tau^2 \int_0^{\tau} [(f(t) - \varphi(t)) \varphi(t) + \varphi(t)^2] dt - \\ & - \tau^3 \int_0^{\tau} \varphi(t) \varphi(t) dt + \frac{\tau^4}{4} \int_0^{\tau} \varphi(t) dt \end{aligned} \quad (13)$$

Условие $\frac{dI}{d\tau} = 0$ приводит к следующему кубическому уравнению для нахождения

$$-2\tau \int_0^{\tau} (f(t) - \varphi(t)) \varphi(t) dt - 2\tau \int_0^{\tau} [(f(t) - \varphi(t)) \varphi(t) + \varphi(t)^2] dt - 3\tau^2 \int_0^{\tau} \varphi(t) \varphi(t) dt + \tau^3 \int_0^{\tau} \varphi(t) dt = 0 \quad (14)$$

Первый корень этого уравнения τ_0 определяет показатель несинхронности сигналов и должен совпадать с аналогичным показателем, полученным по формуле (7). Для показателя идентичности сигналов получаем формулу

$$\chi = \frac{\tau_0}{\|\varphi\|} \quad (15)$$

Таким образом, мы получили три характеристики для оценки различия процессов колебаний течения донной поверхности.

Первая характеристика, τ_0 – несинхронность колебаний, которая оценивается по формуле (7) или на основе решения уравнения (14).

Вторая характеристика, ρ – некогерентность колебаний, определяемая различием их частот. Показатель когерентности оценивается по формуле (8).

Третья характеристика показывает расхождение амплитуд составляемых сигналов и представляет собой первое слагаемое в выражении (11). Обозначим эту величину через ζ . Тогда

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\|\varphi\|}{\|f\|} + \frac{\|f\|}{\|\varphi\|} \right) \quad (16)$$

На основе второго и третьего показателей строится показатель идентичности сигналов по формуле (14).

Рассмотрим влияние неидентичности сигналов, например недемпфированного маятника массой « m » и жесткостью « c » с двумя опорными пунктами. Уравнение его движения можно записать в виде

$$m\ddot{q} + cq = cf + \varphi(t) \quad (17)$$

где q – полное смещение маятника относительно неподвижного наблюдателя.

При этом

$$q = c \int_0^t [f(\theta) + \varphi(\theta)] h(t - \theta) d\theta \quad (18)$$

где $h(t) = \frac{1}{k} \sin kt$; $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$

Базовым будет решение при $\varphi=f$, т. е.

$$q_0 = 2c \int_0^t f(\theta) h(t - \theta) d\theta \quad (19)$$

Искажение решения вследствие неидентичности возмущений под опорами можно оценить следующим показателем

$$d = \frac{\int_0^T (q - q_b)^2 dt}{\|q_b\|} \quad (20)$$

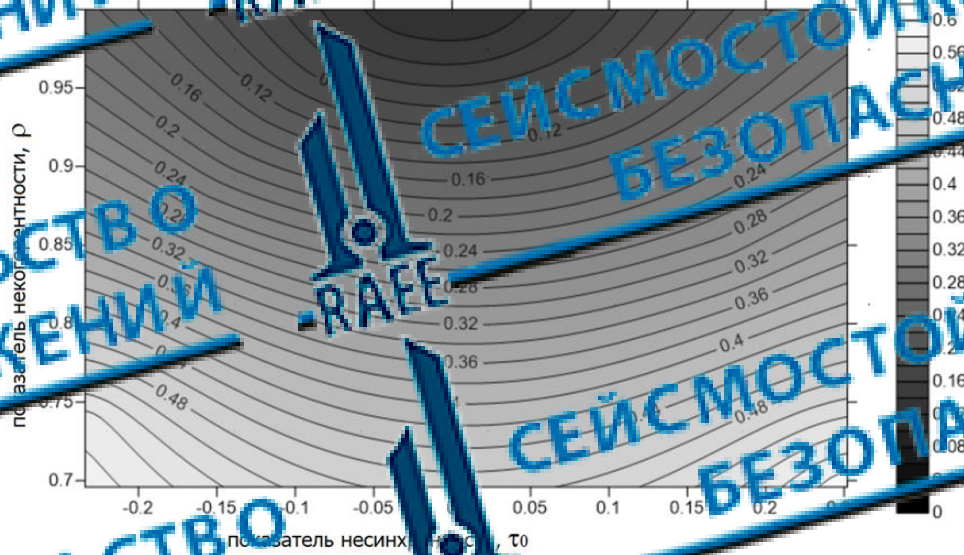


Рисунок 1 – Изолинии искажения решения от показателей некогерентности и несинхронности при показателе расхождения амплитуд $\zeta=1$

Figure 1 – Isolines of the distortion of the solution from the indicators of incoherence and out-of-sync with the indicator of the divergence of amplitudes $\zeta=1$

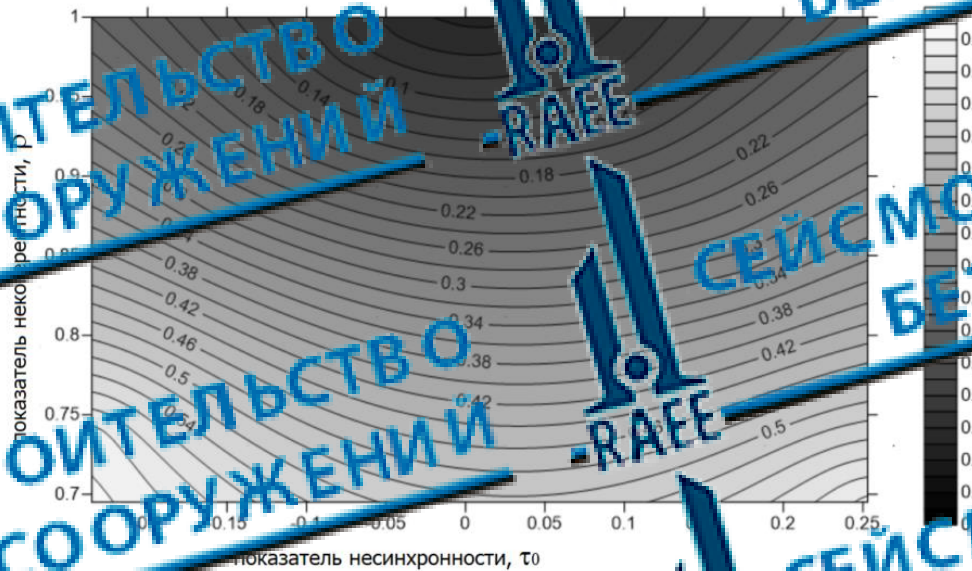


Рисунок 2 – Изолинии искажения решения от показателей некогерентности и несинхронности при показателе расхождение амплитуд $\zeta=1,005$

Figure 2 – Isolines of the distortion of the solution from the indicators of incoherence and out of sync with the indicator of the divergence of amplitudes $\zeta=1,005$

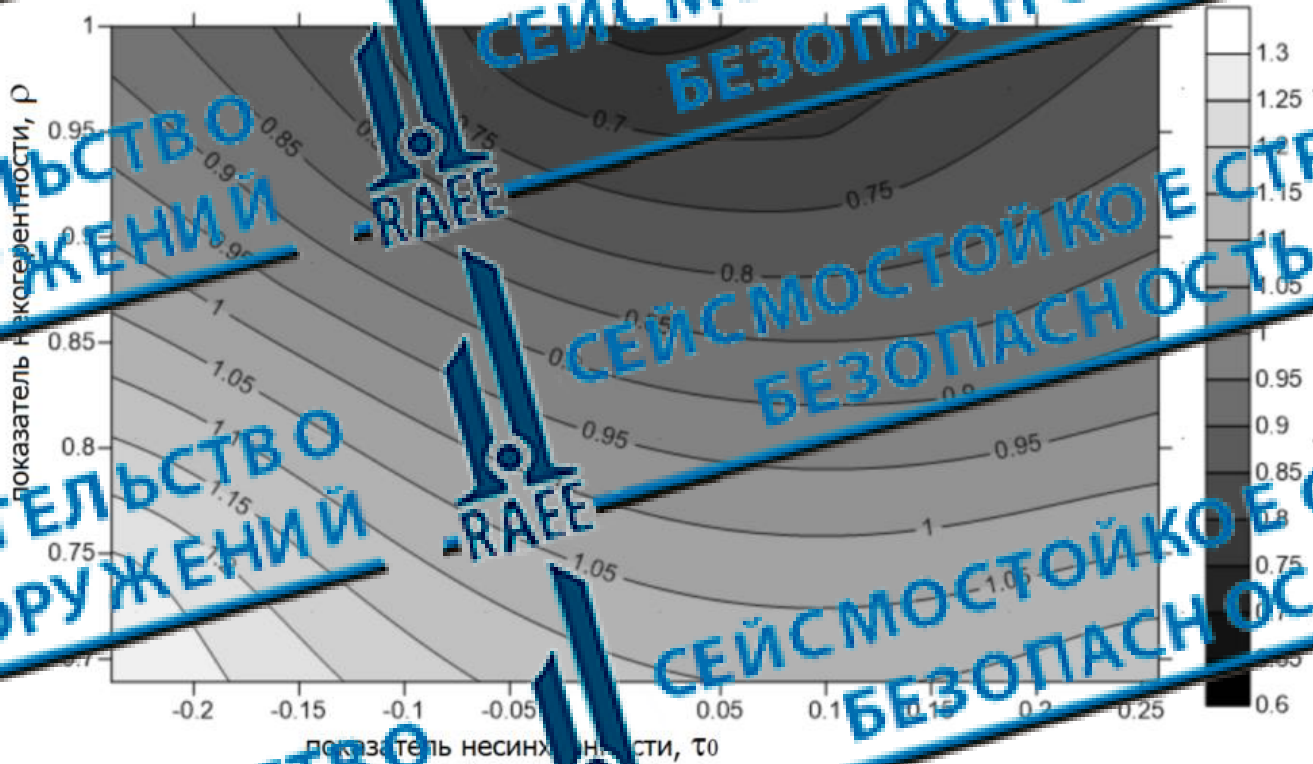


Рисунок 3 – Изолинии искажения решения от показателей некоргерентности и несинхронности при показателе расхождения амплитуд $\zeta=1,083$

Figure 3 – Isolines of the distortion of the solution from the indicators of incoherence and out of sync with the indicator of the divergence of amplitudes $\zeta=1,083$

Предложенные параметры в полной мере характеризуют заданное неоднородности поля ускорений на площадке строительства. При этом они по-разному влияют на отклик системы. Небольшие отклонения показателя амплитуд ζ под опорами слабо уменьшают реакцию сооружения. Что касается некоргерентности возмущений, то этот эффект может приближать или удалять систему от резонанса. В этом случае влияние некоргерентности может быть существенным и резко меняться при приближении к резонансу, особенно у слабо демпфированных систем. Более сложная картина возникает при не синхронности возмущения. Малые значения изменения показателя τ_0 не приводят к большому искажению колебаний, однако в случае, когда τ_0 соизмеримо с частотой возмущения, искажения могут быть весьма существенными.

Список литературы

1. Уздин А.М., Кузнецова Н.О. Сейсмостойкость мостов. – Саарбрюкен (Германия): Palmarium, 2011. – 450 с.
2. Гиман Л.Н., Уздин А.М. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете жесткоопорных конструкций. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – № 2. – С. 22–25.
3. Уздин А.М. Особенности расчета протяженных сооружений с точечным опиранием на грунт по спектральной методике. Экспресс-информация «Сейсмостойкое строительство». – 1992. – № 1. – С. 32–37.

4. Igusa T., Der Kiureghian A. Dynamic response of multiply supported secondary systems. Journal of Engineering Mechanics. (ASCE). – 1985. – Vol. 111, no. 1. – P. 20–41.
5. Petronijević M., Nefovska M., Brčić S. Multiple-support seismic analysis of bridges including soil-structure interaction. Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 180.
6. Smirnov, Lyubov, Uzdin Alexander, Polorotova Natalia, Freze Maxima. Important feature of calculating bridges under seismic action. E3S Web of Conferences 157, 06020 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706020>

References

1. Uzdin A.M., Kuznetsova I. Seismic resistance of bridges. – Saarbrücken (Germany): Palmarium, 2014. – 450 p.
2. Gilman L.N., Uzdin A.M. Current form of representation of seismic impact to assess the correlation of fluctuations of points of the day surface in the calculation of multi support structures. Earthquake-resistant construction. Safety of structures – 2000. – No. 2. – pp. 22-25.
3. Uzdin A.M. Features of calculation of extended structures with point support on the ground by spectral method. Express information "Earthquake-resistant construction" – 1992. – No. 1. – pp. 32-37.
4. Igusa T., Der Kiureghian A. Dynamic response of multiply supported secondary systems. Journal of Engineering Mechanics. (ASCE). – 1985. – Vol. 111, no. 1. – P. 20–41.
5. Petronijević M., Nefovska M., Brčić S. Multiple-support seismic analysis of bridges including soil-structure interaction. Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering. Paper Reference 180.
6. Smirnov, Lyubov, Uzdin Alexander, Polorotova Natalia, Freze Maxima. Important feature of calculating bridges under seismic action. E3S Web of Conferences 157, 06020 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706020>

Информация об авторах / Information about authors

Заалишвили Владислав Борисович, д-р физ.-математических наук, профессор, научный руководитель Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук (ГФИ ВЦ РАН). Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Российская Федерация vzaal@mail.ru
Vladislav B. Zaalisvili, Doctor of Ph.D., Professor, GPHI SC RAS. Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russian Federation vzaal@mail.ru

Смирнова Любовь Николаевна*, канд. техн. наук, научный секретарь АО «ИИД «Строительство». Москва, Российская Федерация lyubovsmirnova80@gmail.com
Lyubov' N. Smirnova, Candidate of Technical Sciences, SC research center of Construction». Moscow, Russian Federation lyubovsmirnova80@gmail.com

Никонова Наталья Вячеславовна, канд. техн. наук, кафедра «Строительные конструкции», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация lovelynataxa@inbox.ru

Natalia V. Nikonova, Candidate of Technical Sciences, St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I. St. Petersburg, Russian Federation lovelynataxa@inbox.ru

Уздин Александр Михайлович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Механика и прочность материалов и конструкций», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация uzdin@mail.ru

Alexander M. Uzdin, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander II, St. Petersburg, Russian Federation uzdin@gmail.ru

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author