

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 204–218.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 204–218.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.045.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-204-218

EDN: ZVTDVK

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНО-УПРУГИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Григорий Иванович Гребенюк¹, Максим Сергеевич Вешкин²,
Виталий Иванович Максак¹, Дарья Александровна Жилина²

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Актуальность. Импульсные нагрузки на сооружения являются одними из наиболее опасных с позиции величин параметров напряжённо-деформированного состояния системы при динамическом воздействии.

Цель исследования – анализ особенностей динамического деформирования линейно-упругих стержневых систем при периодическом импульсном воздействии.

Рассмотрены особенности процессов деформирования линейно-упругих стержневых систем при периодических импульсных воздействиях. На примере простой стержневой системы с дополнительными сосредоточенными массами проведён анализ влияния сочетания параметров нагрузки (протяженность, форма и частота импульсов), а также физических характеристик деформируемой системы на её динамический отклик при заданном воздействии.

Результаты. Сформулированы предпосылки для выявления неблагоприятного (с позиции величин параметров НДС систем) сочетания параметров воздействия с параметрами рассматриваемой системы.

Ключевые слова: упругие стержневые системы, импульсные нагрузки, периодические воздействия, расчет

Для цитирования: Гребенюк Г.И., Вешкин М.С., Максак В.И., Жилина Д.А. Особенности расчета линейно-упругих стержневых систем при периодических импульсных воздействиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 204–218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-204-218. EDN: ZVTDVK

ORIGINAL ARTICLE

STRENGTH ANALYSIS OF LINEAR-ELASTIC FRAME STRUCTURES UNDER PULSE-PERIODIC LOADS

Grigori I. Grebenyuk¹, Maksim S. Veshkin²,
Vitali I. Maksak¹, Dar'ya A. Zhilina²

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia

Abstract. Pulse-periodic loads on structures are one of the most dangerous for the their stress-strain state under dynamic load.

Purpose: The aim of the work is to analyze the dynamic deformation of linear-elastic frame structures under pulse-periodic loads.

Approach: It is found that a simple frame structure with additional concentrated masses affects the loading parameters (length, shape and pulse frequency). The analysis is given to physical characteristics of the deformed structure and its dynamic response under the pulse-periodic load.

Research findings: Prerequisites are formulated for an unfavorable (from the position of VAT parameters) combination of the load and structural parameters.

Keywords: elastic rod systems; impulse loads; periodic exposures; calculation

For citation: Grebenyuk G.I., Veshkin M.S., Maksak V.I., Zhilina D.A. Strength analysis of linear-elastic frame structures under pulse-periodic loads. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 204–218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-204-218. EDN: ZVTDVK

Введение

Импульсные нагрузки на сооружения, особенно нагрузки большой мощности и малой протяженности во времени (ударные), являются одними из наиболее опасных с позиции величин параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС) системы при динамическом воздействии [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Опасность подобного вида нагрузок может увеличиться при периодическом импульсном воздействии [9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Многие работы, выполненные в последнее время в направлении развития методов расчета динамически нагруженных систем (в том числе стержневых), связаны с уточнением модели деформирования материала. Некоторые исследования затрагивают вопросы динамики систем из композитных стержней [7, 8]. Значительно меньше внимания уделено учету особенностей динамического воздействия, в частности, периодическому характеру импульсных нагрузок.

Некоторые исследования в этой области посвящены математической стороне описания процессов при периодических импульсных воздействиях [12, 13, 14, 15]. Значительно меньше внимания уделено рассмотрению и практическому расчёту систем под действием периодических импульсных воздействий [16, 17, 18].

Между тем такие воздействия могут вызывать как природные явления (удары волн на гидротехнические сооружения, ветровые порывы), так и технологические процессы на промышленных объектах.

Целью настоящего исследования является анализ особенностей динамического деформированием линейно-упругих стержневых систем при периодическом импульсном воздействии.

Основные характеристики периодических импульсных нагрузок

В качестве основных характеристик периодических импульсных воздействий рассматриваются:

– T_{imp} – длительность импульса (для протяжённых импульсов), T_{rep} – период повторения импульсов, Imp – значение отдельного импульса;

– места приложения импульсных нагрузок.

Соотношение:

$$k_{i-r} = \frac{T_{imp}}{T_{rep}}. \quad (1)$$

Периодические мгновенные (ударные) импульсы

При рассмотрении мгновенных периодических импульсов вычисляются приращения скорости точек, в которые прикладывается импульсное воздействие:

$$[m]\Delta\dot{Z} + R_s = 0. \quad (2)$$

Здесь $[m]$ – матрица масс; $\Delta\dot{Z}$ – вектор приращений скорости; R_s – вектор узловых «мгновенных реакций», вызванных мгновенными импульсами.

В промежутке времени между двумя соседними импульсами рассматривается свободное движение системы. Начальными условиями при рассмотрении последующего интервала времени являются перемещения и скорости точек системы в конце предыдущего интервала времени.

Периодические протяжённые импульсы

При рассмотрении протяжённых периодических импульсов последовательно чередуются промежутки движения системы под действием динамической нагрузки (неустановившиеся вынужденные колебания) и свободное движение системы. Начальными условиями при рассмотрении последующего интервала времени являются перемещения и скорости точек системы в конце предыдущего интервала.

«Наложение» периодических протяжённых импульсов

В случае, когда длительность периодических импульсов превышает период их повтора, импульсную нагрузку можно представить в виде двух составляющих: постоянной составляющей (за счёт наложения двух и более соседних импульсов) и динамической составляющей, обусловленной формой импульсов и их сменой. Следует отметить, что динамическая составляющая таких импульсов снижается по мере повышения длительности отдельных импульсов. Пример наложения синусоидальных импульсов длительностью $T_{imp} = 1$ с и периодом повтора $T_{rep} = 0,4$ с приведён на рис. 1

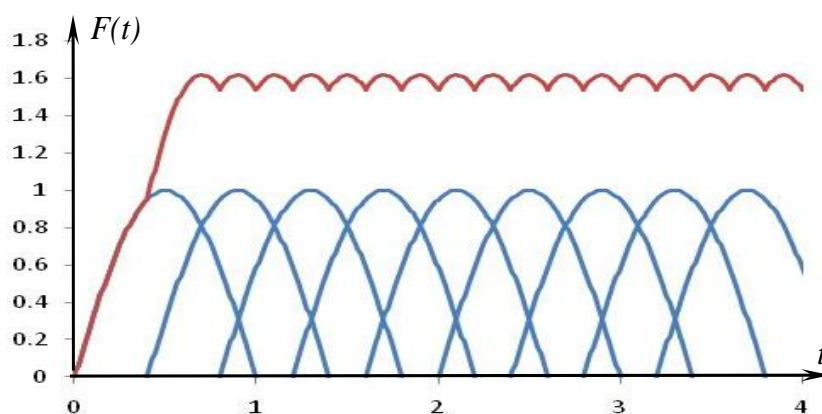


Рис. 1. Пример наложения периодических импульсов
Fig. 1. Example of periodic pulse application

О корректном учёте периодических импульсов с позиции средней мощности периодического воздействия

Введём параметр периодической нагрузки – *средняя по модулю мощность периодического воздействия*. Для описания этой величины проведём следующие рассуждения.

Обозначим время, соответствующее одному периоду действия гармонической нагрузки (или одному периоду повтора импульсной нагрузки):

$$T_{rep} = \frac{1}{f_F} = \frac{2\pi}{\omega_F}, \quad (3)$$

где f_F – частота, Гц; ω_F – круговая частота, с^{-1} .

При установившихся вынужденных колебаниях импульс, переданный системе за один период действия гармонической нагрузки, с учетом сонаправленности нагрузки и движения системы (функция нагрузки в формуле (4) учитывается по модулю) составляет

$$\begin{aligned} P_{harm} &= \int_0^{T_{rep}} F_0 |\sin(\omega_F \cdot t)| dt = \\ &= \int_0^{0.5T_{rep}} F_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right) dt + \int_{0.5T_{rep}}^{T_{rep}} F_0 \left(-\sin\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right)\right) dt = \\ &= \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right) \right]_0^{0.5T_{rep}} + \cos\left(\frac{2\pi}{T_{rep}} t\right) \Big|_{0.5T_{rep}}^{T_{rep}} = \\ &= \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{2\pi} [4] = 2 \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{\pi}, \end{aligned} \quad (4)$$

где F_0 – амплитуда гармонической нагрузки.

При стабилизации амплитуд и форм откликов системы (во времени) под действием периодических импульсов импульс, переданный системе за один период, равен значению отдельного импульса Imp :

$$P_{imp} = Imp . \quad (5)$$

Для периодических импульсов синусоидальной формы длительностью T_{imp} (рис. 2) импульс, переданный системе за один период:

$$\begin{aligned} P_{imp} &= \int_0^{T_{imp}} F_{0imp} \sin\left(\frac{\pi}{T_{imp}} t\right) dt = \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} \left[-\cos\left(\frac{\pi}{T_{imp}} t\right) \right]_0^{T_{imp}} = \\ &= \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} [1 + 1] = 2 \frac{F_{0imp} \cdot T_{imp}}{\pi} , \end{aligned} \quad (6)$$

где F_{0imp} – амплитуда синусоидального импульса (рис. 2).

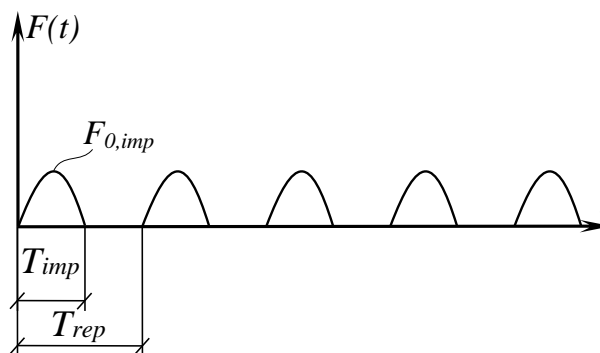


Рис. 2. График периодических импульсов синусоидальной формы во времени
Fig. 2. Periodic sinusoidal pulses over time

Для простоты рассмотрим период времени, соответствующий n периодам действия нагрузки:

$$T_n = n \cdot T_{rep} . \quad (7)$$

Для гармонической нагрузки средняя мощность периодического воздействия составит

$$P_{spec, harm} = \frac{n \cdot P_{harm}}{T_n} = \frac{n}{n \cdot T_{rep}} 2 \frac{F_0 \cdot T_{rep}}{\pi} = 2 \frac{F_0}{\pi} , \quad (8)$$

т. е. для гармонической нагрузки значение $P_{spec, harm}$ является частотно независимым.

Для периодической импульсной нагрузки средняя мощность составит

$$P_{spec, imp} = \frac{n \cdot P_{imp}}{T_n} = \frac{n}{n \cdot T_{rep}} Imp = f_F \cdot Imp . \quad (9)$$

При синусоидальной форме периодических импульсов, с учётом (6), средняя мощность

$$P_{\text{spec, imp}} = \frac{n \cdot P_{\text{imp}}}{T_n} = \frac{n}{n \cdot T_{\text{rep}}} 2 \frac{F_{0\text{imp}} \cdot T_{\text{imp}}}{\pi} = f_F 2 \frac{F_{0\text{imp}} \cdot T_{\text{imp}}}{\pi}, \quad (10)$$

и в случае периодической импульсной нагрузки значение $P_{\text{spec, imp}}$ является частотно зависимым.

Таким образом, для корректного сравнения периодических импульсных нагрузок различной частоты, а также сопоставления их с гармоническими нагрузками, с позиции соответствия значений средней мощности периодического воздействия $P_{\text{spec, imp}}$, следует учитывать, что значения периодических импульсов Imp должны быть обратно пропорциональны их частоте:

$$Imp = \frac{k}{f_F}, \quad (11)$$

где k – константа.

При сравнении с гармонической нагрузкой с учётом соответствия по выражениям (8) и (9)

$$Imp = 2 \frac{F_0}{\pi \cdot f_F}. \quad (12)$$

Для периодических импульсов синусоидальной формы их амплитуда $F_{0\text{imp}}$, соответствующая амплитуде гармонической нагрузки F_0 , выражается из формул (8), (10):

$$F_{0\text{imp}} = \frac{F_0}{T_{\text{imp}} \cdot f_F} = \frac{F_0 \cdot T_{\text{rep}}}{T_{\text{imp}}}. \quad (13)$$

Основные задачи исследования

В настоящем исследовании рассмотрены следующие задачи оценки динамического отклика системы на периодические импульсные воздействия:

1. Развитие процесса колебаний во времени в условиях резонансного и нерезонансного процессов.
2. Влияние параметра k_{i-r} на НДС системы в условиях резонансного процесса, а также сравнение с динамическим откликом системы при действии гармонических нагрузок.
3. Рассмотрение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) колебаний системы.

Исследование влияния основных характеристик периодических импульсных воздействий на динамические отклики системы

Для исследования влияния перечисленных выше факторов и выявления их неблагоприятных сочетаний (в отношении динамического отклика) рассмотрена стержневая система, представленная на рис. 3.

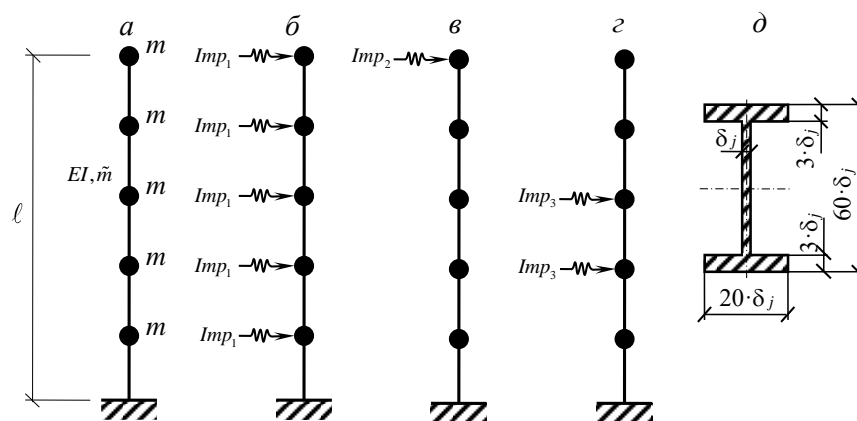


Рис. 3. Расчётная схема стержневой системы:

a – стержневая система; *б* – схема импульсных нагрузок во все узлы; *в* – схема импульсной нагрузки в крайний узел; *г* – схема импульсных нагрузок в промежуточные узлы; *д* – форма сечений элементов

Fig. 3. Design scheme of frame structure:

a – frame structure; *b* – pulse delivery to all nodes; *c* – pulsed load at extreme node; *d* – pulse delivery to intermediate nodes; *e* – section shape

$EI = 232\,432,2 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$, $EA = 3\,654\,000 \text{ кН}$ – жесткостные характеристики стержней; $\delta_j = 0,01 \text{ м}$ – параметр, определяющий размеры сечения; $m = 0,1 \text{ т}$ – узловые массы; $\tilde{m} = 0,1366 \text{ т/м}$ – погонная масса стержня; $\gamma = 0,022$ – коэффициент внутреннего трения стали; Imp_1 , $Imp_2 = 5Imp_1$, $Imp_3 = 2,5Imp_1$ – узловые периодические импульсы. Собственный вес системы не учитывался.

Было выполнено сравнение откликов системы при действии периодических импульсов с соответствующими откликами при действии гармонической нагрузки (рис. 4).

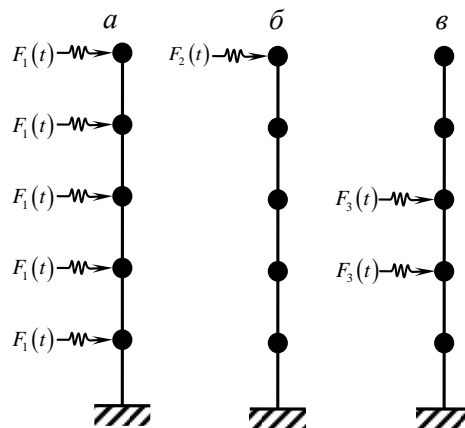


Рис. 4. Варианты приложения узловой гармонической нагрузки:

a – во все узлы; *б* – в крайний узел; *в* – в промежуточные узлы

Fig. 4. Harmonic load applications:

a – to all nodes; *b* – to extreme node; *c* – to intermediate nodes

$$F_k(t) = F_{0k} \sin(\omega_F t). \quad (14)$$

Амплитуды гармонической нагрузки приняты соответственно: $F_{0,1} = 0,13152$ (кН); $F_{0,2} = 5F_{0,1}$; $F_{0,3} = 2,5F_{0,1}$.

Периодические импульсные воздействия приняты в соответствии с условием одинаковой средней мощности. Подробно этот вопрос рассматривался выше. Согласно формуле (12), значения периодических импульсов, сопоставляемых с гармонической нагрузкой, приняты

$$Imp_k = 2 \frac{F_{0k}}{\pi \cdot f_F} = 2 \frac{F_{0k} \cdot T_{rep}}{\pi}, \quad (15)$$

т. е. $Imp_1 = 0,08373T_{rep}$ (кН·с), $Imp_2 = 5Imp_1$, $Imp_3 = 2,5Imp_1$.

Для синусоидальных периодических импульсов длительностью T_{Imp} , согласно формуле (13), их амплитуды выражаются: $F_{0,1 Imp} = 0,13152T_{rep}/T_{Imp}$ (кН), $F_{0,2 Imp} = 5F_{0,1 Imp}$, $F_{0,3 Imp} = 2,5F_{0,1 Imp}$.

В качестве параметров НДС системы рассматривались напряжения в крайнем волокне наиболее опасного сечения (во всех рассмотренных случаях это сечение располагалось у жесткой заделки):

$$\sigma_{eqv}(t) = \frac{M_j(t)}{W_j}. \quad (16)$$

Далее рассмотрим результаты задач, сформулированных выше.

Задача 1

На рис. 5, 6 приведена зависимость $\sigma_{eqv}(t)$ в сечении возле заделки при действии периодических синусоидальных импульсов в крайний узел (рис. 3, в) на первой собственной частоте (резонансный случай) при $T_{rep} = 1/f_1$ и $T_{Imp} = 0,000001$ с.

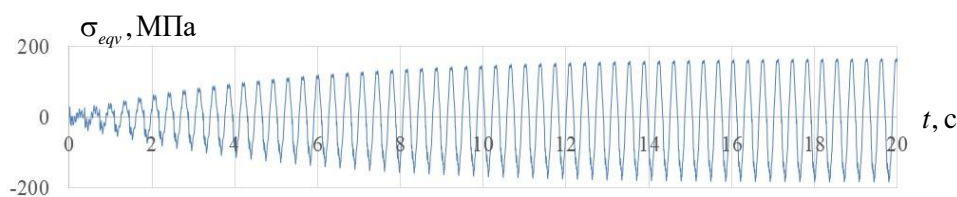


Рис. 5. Зависимость σ_{eqv} от времени при периодических импульсах с частотой повторения, равной первой собственной частоте

Fig. 5. Dependence between normal stress σ_{eqv} and periodic pulse frequency equaling to the first natural frequency

Амплитуда σ_{eqv} в первом периоде действия импульсной нагрузки составила 14 %, а после 45 импульсов достигла уровня 97 % от амплитуды σ_{eqv} при стабилизации процесса колебаний (рис. 6).

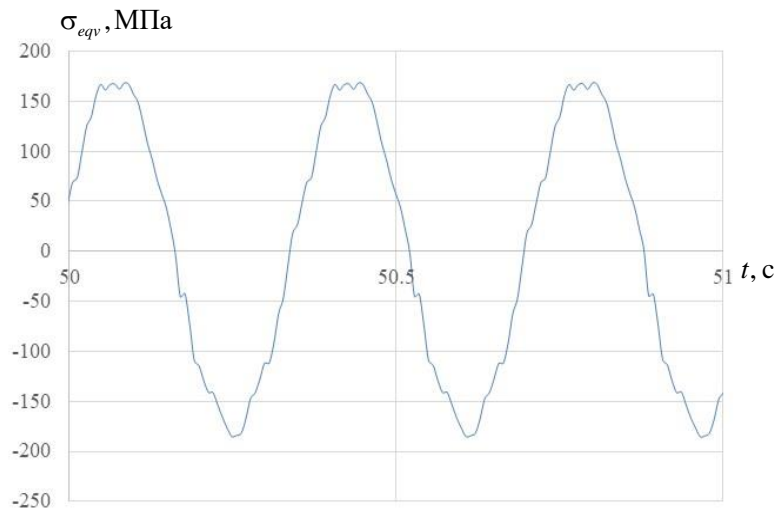


Рис. 6. Зависимость σ_{eqv} от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной первой собственной частоте (участок стабилизации амплитуд параметров отклика системы)

Fig. 6. Dependence between normal stress σ_{eqv} and periodic pulse frequency equaling to the first natural frequency (time interval when the system response parameters stabilize)

На рис. 7, 8 приведена зависимость $\sigma_{eqv}(t)$ в сечении возле заделки при действии периодических синусоидальных импульсов в крайний узел (рис. 3, в) на частоте $f_F = 0,833f_1$ (где f_1 – первая частота собственных колебаний системы), $T_{rep} = 1,2/f_1$ и $T_{Imp} = 0,000001$ с.

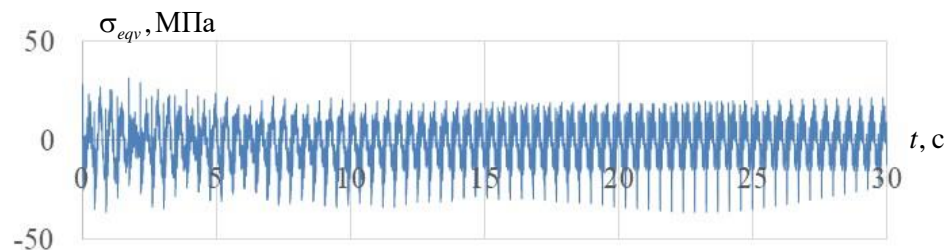


Рис. 7. Зависимость σ_{eqv} от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной 0,833 первой собственной частоты

Fig. 7. Dependence between normal stress σ_{eqv} and periodic pulse frequency of 0.833 of the natural frequency

Максимальная амплитуда σ_{eqv} , начиная с первого периода действия импульсной нагрузки, существенно не изменяется и определяется значением одиночного импульса. Ярко выражены высокочастотные составляющие колебаний. Наблюдается биение амплитуды колебаний.

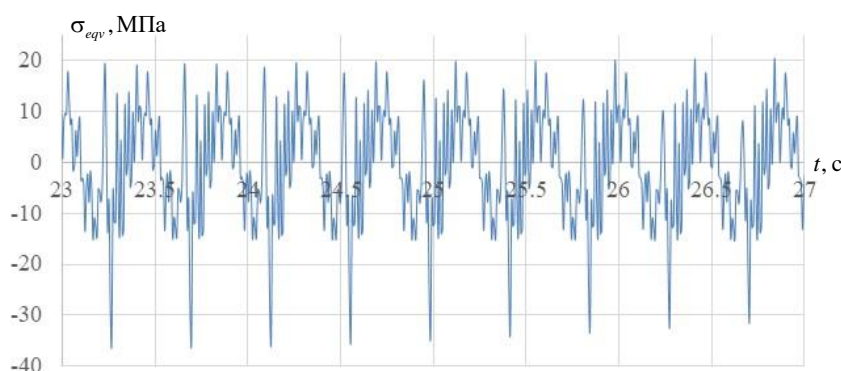


Рис. 8. Зависимость σ_{eqv} от времени при периодических импульсах с частотой повтора, равной 0,833 первой собственной частоты (участок максимальных амплитуд параметров отклика системы)

Fig. 8. Dependence between stress σ_{eqv} and periodic pulse frequency equal of 0.833 of the first natural frequency (time interval when the system response parameters stabilize)

Задача 2

На рис. 9 приведена зависимость максимальных амплитуд σ_{eqv} от k_{i-r} в сечении возле заделки при действии периодических синусоидальных импульсов во все узлы (рис. 3, б) на частоте $f_F = f_1$ (для наглядности значения k_{i-r} приведены по убыванию на логарифмической шкале). Пунктиром показаны амплитуды σ_{eqv} при действии гармонической нагрузки. Пересечение графиков соответствует значению $k_{i-r} = 0,5$ (т. е. при длительности импульса $T_{imp} = 0,5T_{rep}$). При уменьшении k_{i-r} график имеет асимптотический характер. Значения σ_{eqv} при стремлении k_{i-r} к нулю (соответствующему мгновенному импульсу) превосходят соответствующие напряжения при гармонической нагрузке на 29 %.

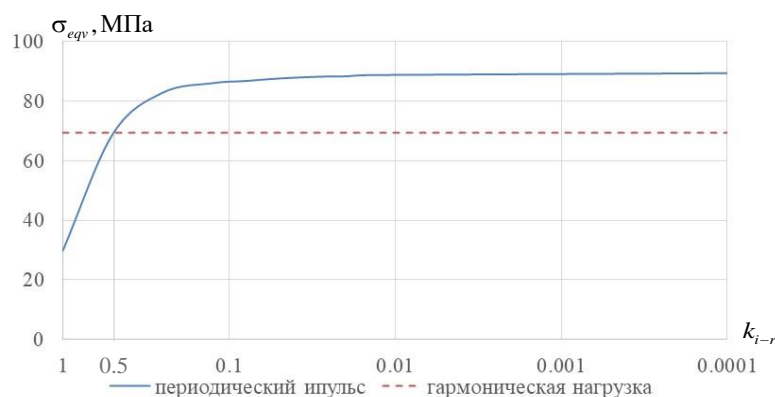


Рис. 9. Зависимость σ_{eqv} от коэффициента k_{i-r} (частота повтора импульсов равна первой собственной частоте) в сравнении с σ_{eqv} при гармоническом воздействии аналогичной мощности

Fig. 9. $\sigma_{eqv} - k_{i-r}$ dependence (pulse repetition frequency is equal to the first natural frequency) in comparison with σ_{eqv} dependence under harmonic influence of similar power

Задача 3

На рис. 10 приведены сравнения АЧХ динамических откликов системы для различных вариантов приложения периодических импульсов. При сравнении результатов действия периодических импульсов на различных частотах учитывались особенности, изложенные выше. Графики 1, 2, 3 (рис. 10) относятся к вариантам приложения нагрузок на рис. 3, б, в, г соответственно. Как и в случае гармонических нагрузок, наибольшие проявления резонансных явлений соответствуют случаю действия нагрузки в крайний узел (рис. 3, в). Такой результат обусловлен тем, что нагрузка приложена в точку системы с наибольшим относительным линейным перемещением как в первой, так и во второй форме колебаний. Следует обратить внимание, что в случае периодических импульсов весьма существенными оказываются резонансные явления на кратных частотах (в частности, на частотах $0,5f_1$ и $0,5f_2$).

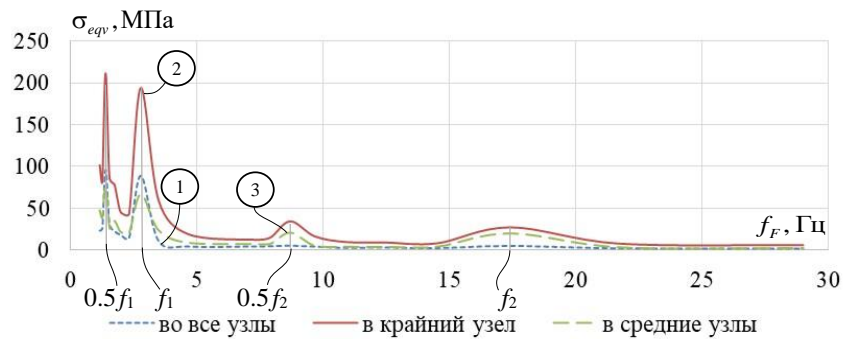


Рис. 10. Зависимость σ_{eqv} от частоты периодических импульсов

Fig. 10. Dependence between σ_{eqv} and periodic pulse frequency

На рис. 11 приведены сравнения АЧХ динамических откликов системы при действии преиодических импульсов (график 1) и при действии гармонической нагрузки (график 2) в крайний узел системы (рис. 3, в, рис. 4, б).

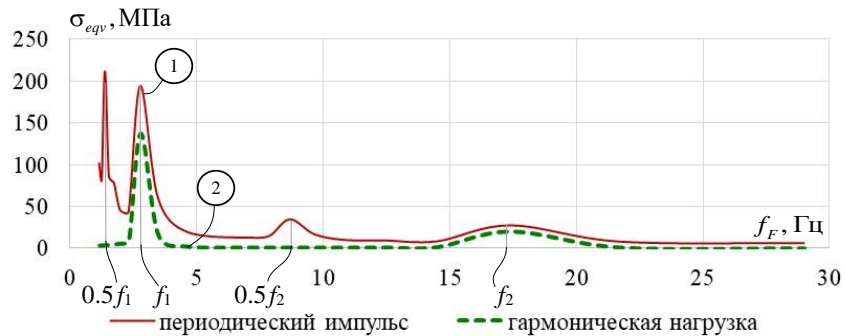


Рис. 11. Зависимость σ_{eqv} от частоты периодической нагрузки (сравнение случая периодических импульсов и гармонической нагрузки)

Fig. 11. Dependence between σ_{eqv} and periodic load (comparison of periodic pulses and harmonic load)

Графики демонстрируют, что резонансные явления на кратных частотах проявляются только в случае периодических импульсов. Для гармонической нагрузки подобные явления не проявляются. Обращая внимание на участок АЧХ в зоне первой частоты, можно наблюдать возрастание резонансных явлений, что объясняется наибольшим на этом участке количеством кратных значений собственных частот.

В зонах нерезонансных случаев периодическое воздействие также вызывает более существенный отклик НДС системы, но это объясняется наличием высокочастотных составляющих в отклике системы, вызывающих всплески амплитуд напряжений (см. рис. 8).

Основные выводы

1. Периодические импульсные воздействия при постоянном значении отдельных импульсов Imp в случае резонансного процесса приводят к существенному росту параметров НДС отклика системы с дальнейшей стабилизацией амплитуд и форм откликов системы (во времени) после некоторого числа циклов нагружения.

2. В случае нерезонансного процесса рост параметров НДС отклика системы не наблюдается, а после значительно меньшего числа циклов нагружения также наступает стабилизация амплитуд и форм откликов системы (во времени).

3. В отличие от гармонической нагрузки периодические импульсные воздействия вызывают существенные резонансные явления на частотах, кратных собственным частотам системы.

4. Наиболее опасными для системы с точки зрения амплитуд параметров НДС, при условии одинаковой средней мощности периодических импульсов, являются резонансы на частотах ниже первой собственной частоты и кратных низшим собственным частотам.

5. Амплитуды σ_{eqv} при стремлении длительности периодической импульсной нагрузки к мгновенным импульсам в резонансном процессе на первой собственной частоте оказались существенно выше (на 40 %) аналогичных откликов при гармонической нагрузке той же средней мощности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Зылев В.Б. Строительная механика. Книга 2. Динамика и устойчивость упругих систем. Москва : Высшая школа, 2008. 384 с.
2. Клаф Ф., Пензиен Дж. Динамика сооружений. Москва : Стройиздат, 1979. 319 с.
3. Харрис С.М., Крид Ч.И. Справочник по ударным нагрузкам. Ленинград : Судостроение, 1980. 360 с.
4. Справочник по динамике сооружений / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. Москва : Стройиздат, 1972. 512 с.
5. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. 372 с.
6. Grebenyuk G., Veshkin M., Nosireva O., Maksak V. Stress-strain state analysis and optimization of rod system under periodic pulse load // MATEC Web of Conferences, Tomsk, V. 143. Tomsk : EDP Sciences, 2018. P. 01003. DOI: 10.1051/mateconf/201714301003. EDN: XXUSOT

7. *Немировский Ю.В., Мищенко А.В.* Динамический расчет систем профилированных композитных стержней // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 2. С. 188–199. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.2.16. EDN: TYIRJR
8. *Мищенко А.В., Немировский Ю.В.* Построение решений задач динамики композитных стержней на основе метода Бубнова – Галеркина // Омский научный вестник. 2015. № 3(143). С. 320–324. EDN: VCNUXZ
9. *Дукарт А.В.* Задачи теории ударных гасителей колебаний. Москва : Изд-во АСВ, 2006. 205 с.
10. *Себешиев В.Г., Гербер Ю.А.* Регулирование с помощью динамических гасителей колебаний напряженно-деформированного состояния систем с конечным числом степеней свободы при гармонических воздействиях (решение в перемещениях масс с матрицей жесткости) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 5–19.
11. *Gerber Yu.A., Sebeshev V.G.* Regulation of dynamic stress-strain state and reliability of deformable systems with vibration dampers under harmonic loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. Ural Federal University. 2020. P. 012013.
12. *Сильченко О.Б.* Анализ автоколебательной упругой обрабатывающей системы под действием периодической импульсной нагрузки в процессе пластичного микрорезания алмазов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 3. С. 215–216. EDN: MUXBVR
13. *Бивзюк В.О., Слынько В.И.* Достаточные условия устойчивости линейных дифференциальных уравнений с периодическим импульсным воздействием // Математический сборник. 2019. Т. 210. № 11. С. 3–23. DOI: 10.4213/sm9154. EDN: YKRHRO
14. *Гетманова Е.Е.* Дискретный спектр частот биений осциллятора при периодическом импульсном воздействии // SWorld : сборник научных трудов. 2013. Т. 3. № 3. С. 10–15. EDN: REPZPN
15. *Анашкин О.В., Седова Н.О., Юсупова О.В.* Бифуркации периодических решений дифференциального уравнения с импульсным воздействием // Динамические системы. 2017. Т. 7 (35). № 4. С. 395–403. EDN: XTGYAP
16. *Митрошин В.А., Мондрус В.Л.* Учет ударного воздействия при движении поездов метрополитена в расчете компонентов напряженно-деформированного состояния на контуре тоннельной обделки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 41–48. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.41-48. EDN: MFMJJE
17. *Потапов А.Н.* Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. 167 с.
18. *Гребенюк Г.И., Вешкин М.С.* Разработка алгоритмов численного расчёта и оптимизации стержневых систем при действии импульсных нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 106–116.

REFERENCES

1. *Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Zylev V.B.* Construction mechanics. Book 2. Dynamics and stability of elastic systems. Moscow: Vysshaya shkola, 2008. 384 p. (In Russian)
2. *Klaf F., Penzien Dzh.* Dynamics of structures. Moscow: Strojizdat, 1979. 319 p. (In Russian)
3. *Kharris S.M., Krid Ch.I.* Impact load handbook. Leningrad: Sudostroenie, 1980. 360 p. (In Russian)
4. *Korenev B.G., Rabinovich I.M. (Eds.)* Handbook of the dynamics of structures. Moscow: Strojizdat, 1972. 512 p. (In Russian)
5. *Lyahovich L.S.* Special properties of optimal systems and main directions of their implementation in structural analysis. Tomsk: TSUAB, 2009. 372 p. (In Russian)
6. *Grebenyuk G., Veshkin M., Nosireva O., Maksak V.* Stress-strain state analysis and optimization of frame structure under pulse-periodic load. *Matec Web of Conferences*. 2018; 143: 01003. DOI: 10.1051/mateconf/201714301003. EDN: XXUSOT (In Russian)
7. *Nemirovskij Yu.V., Mishchenko A.V.* Dynamic calculation of systems of profiled composite rods. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred*. 2015; 8 (2): 188–199. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.2.16. EDN: TYIRJR (In Russian)

8. Mishchenko A.V., Nemirovskij Yu.V. Solutions of composite rod dynamics problems based on the Bubnov-Galerkin method. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2015; 3 (143): 320–324. EDN: VCNUXZ (In Russian)
9. Dukart A.V. Problems of the theory of shock vibration dampers. Moscow: DIA, 2006. 205 p. (In Russian)
10. Sebeshev V.G., Gerber Yu.A. Stress-strain state of multi-degree-of-freedom systems under harmonic excitations by means of dynamic vibration dampers. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2021; 6 (750): 5–19. (In Russian)
11. Gerber Yu.A., Sebeshev V.G. Regulation of dynamic stress-strain state and reliability of deformable systems with vibration dampers under harmonic loads. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020. 012013.
12. Sil'chenko O.B. Auto-oscillating elastic machining system under periodic pulse load during plastic micro-cutting of diamonds. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2000; (3): 215–216. EDN: MUXBVR (In Russian)
13. Bivzyuk V.O., Slyn'ko V.I. Sufficient conditions for stability of linear differential equations with periodic impulse action. *Matematicheskii sbornik*. 2019; 210 (11): 3–23. DOI: 10.4213/sm9154. EDN: YKRHRO (In Russian)
14. Getmanova E.E. Discrete frequency spectrum of oscillator beats under pulse-periodic load. In: *SWorld Coll. Papers*. 2013; 3 (3): 10–15. EDN: REPZPN (In Russian)
15. Anashkin O.V., Sedova N.O., Yusupova O.V. Bifurcations of periodic solutions of differential equation with impulse action. *Dinamicheskie sistemy*. 2017; 7 (4): 395–403. EDN: XTGYAP (In Russian)
16. Mitroshin V.A., Mondrus V.L. Impact during metro train traffic in stress-strain analysis of the tunnel lining contour. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (1): 41–48. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.41-48. EDN: MFMJJE (In Russian)
17. Potapov A.N. Dynamic analysis of discrete dissipative systems under non-stationary effects. Chelyabinsk, 2003. 167 p. (In Russian)
18. Grebenyuk G.I., Veshkin M.S. Logical design of numerical calculation and optimization of bar systems under dynamic loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; 4 (45): 106–116. (In Russian)

Сведения об авторах

Гребенюк Григорий Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003 г. Томск, пл. Соляная, 2, greb@sibstrin.ru

Вешкин Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008 г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, max.vs@list.ru

Максак Виталий Иванович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003 г. Томск, пл. Соляная, 2.

Жилина Дарья Александровна, студентка, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008 г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, d.zhilina@sibstrin.ru

Authors Details

Grigori I. Grebenyuk, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solanaya Str., 634002, Tomsk, Russia greb@sibstrin.ru

Maksim S. Veshkin, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, max.vs@list.ru

Vitali I. Maksak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solanaya Str., 634002, Tomsk, Russia

Dar'ya A. Zhilina, Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, d.zhilina@sibstrin.ru

Вклад авторов

Гребенюк Г.И. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Вешкин М.С. – развитие методологии; разработка расчетных программ и их реализации; выполнение расчетов с их использованием; написание исходного текста; итоговые выводы; набор текста статьи.

Максак В.И. – анализ данных; редактура.

Жилина Д.А. – выполнение расчетов с использованием разработанных расчетных программ; набор текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Grebenyuk G.I. supervision, conceptualization, methodology; writing; conclusions.

Veshkin M.S. methodology; program development and implementation; calculations; writing – original draft preparation; conclusions.

Maksak V.I. data curation, editing.

Zilina D.A. calculations, writing manuscript.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22.03.2024
Одобрена после рецензирования 28.03.2024
Принята к публикации 29.03.2024

Submitted for publication 22.03.2024
Approved after review 28.03.2024
Accepted for publication 29.03.2024