

МЕХАНИКА

MECHANICS

Научная статья

УДК 534.1

doi: 10.17223/19988621/93/6

Динамические режимы виброзащитных систем**Сергей Павлович Глушков¹, Наталья Владимировна Молокова²,
Дарья Андреевна Проворная³**^{1,2,3} *Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия*¹ *rcpl.glushkov@yandex.ru*² *molokovada@gmail.com*³ *provornayadarya@yandex.ru*

Аннотация. Динамические характеристики виброзащитных систем играют важную роль при их изучении. Так как виброзащитные системы должны удовлетворять требованиям, обеспечивающим надежную эксплуатацию защищаемого объекта, для определения оптимальных размеров устройства виброизоляции необходимо исследовать его динамические режимы. Такие исследования будут производиться путем возмущающего воздействия с помощью моделирования на ЭВМ. По анализу отклика на это воздействие оценим эффективность устройства.

Ключевые слова: виброзащита, динамика, устройства, сигнал, коэффициент, гаситель

Для цитирования: Глушков С.П., Молокова Н.В., Проворная Д.А. Динамические режимы виброзащитных систем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 93. С. 67–78. doi: 10.17223/19988621/93/6

Original article

Dynamic modes of a vibration isolation system**Sergey P. Glushkov¹, Natal'ay V. Molokova², Dar'ya A. Provornaya³**^{1,2,3} *Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation*¹ *rcpl.glushkov@yandex.ru*² *molokovada@gmail.com*³ *provornayadarya@yandex.ru*

Abstract. To specify the optimal dimensions of the vibration isolation device that meet the requirements, it is necessary to determine the dynamic modes of the device. In this paper, perturbation techniques are used to solve the formulated problem and evaluate the device efficiency.

When using dynamic vibration dampers, the vibrations are suppressed by the damper springs. The increase in their stiffness is determined by the forces arising during the additional mass motion. The dynamic characteristics of the considered system with a vibration damper are calculated using the Simulink modeling tool.

It is revealed that the frequencies of free vibrations in the “basic mass – dynamic damper” system are determined by two parameters, namely, the mass ratio of the dynamic damper and main structure, as well as the damper settings. The obtained free vibration frequencies of the system are located almost symmetrically relative to the natural free vibration frequency of the main structure. Variation in the tuning frequency induces symmetry breaking.

Keywords: vibration isolation, dynamics, devices, signal, coefficient, damper

For citation: Glushkov, S.P., Molokova, N.V., Provornaya, D.A. (2025) Dynamic modes of a vibration isolation system. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 93. pp. 67–78. doi: 10.17223/19988621/93/6

Введение

С развитием строительных технологий, а также с разработкой новых высокоэффективных материалов за последние годы мостовые сооружения стали более гибкими, а длина пролетов увеличилась, что привело к созданию более легких и тонких конструкций, которые применяются при строительстве пешеходных мостов, а также автомобильных и железнодорожных. Следовательно, эти конструкции начали становиться более восприимчивыми к динамическим воздействиям движущихся нагрузок. Примерами могут служить возникновения чрезмерных вибраций на лондонском пешеходном мосту Миллениум и Волгоградском автомобильном мосту. В первый же день лондонский мост испытал горизонтальные колебания со смещением центрального пролета около 70 мм, вызванные синхронизированной горизонтальной нагрузкой от пешеходов. Через два дня после открытия мост был закрыт для выяснения причины вибраций и разработки способов уменьшения колебаний мостового сооружения. После тщательного анализа было принято решение о пассивном демпфировании с использованием 37 вязкостно-жидкостных амортизаторов и 52 настраиваемых амортизаторов массы для управления поведением моста.

Что касается области исследований, связанной с динамическим поведением мостов, то воздействие высокоскоростного движения на железнодорожные мосты в настоящее время является одной из наиболее специфических и актуальных сфер изучения. Этим можно объяснить растущий интерес к строительству новых высокоскоростных линий, а также к переоборудованию некоторых обычных железнодорожных линий для работы на более высоких скоростях.

Поэтому представляет большой интерес исследование колебаний мостовых сооружений для удовлетворения следующих требований на высокоскоростных железнодорожных мостах:

- 1) безопасность и работоспособность мостов;
- 2) предотвращение увеличения максимальных перемещений моста, ускорений и внутренних напряжений;
- 3) ограничение ускорений вагонов поездов, так как это связано с комфортом пассажиров.

Для улучшения динамических характеристик мостов существует два различных решения: первый, возможно, более традиционный, состоит в повышении жесткости конструкции, в то время как другой заключается в усилении демпфирования. Цель данной работы – исследование возможных решений, связанных с усилением демпфирования мостовых сооружений с помощью пассивных настроенных амортизаторов массы.

Постановка задачи

Ванг и др. [1] изучили применимость пассивных настроенных амортизаторов массы на мостах с простой опорой и пролетом 30 и 40 м для подавления вибраций, вызванных высокоскоростными поездами, движущимися с постоянной скоростью. Реакции моста были проверены с точки зрения вертикальных перемещений, ускорения и конечного поворота моста, в то время как для поезда было проанализировано вертикальное ускорение, чтобы обеспечить безопасность моста и комфорт пассажиров. В середине пролета каждого моста рассматривался один динамический гаситель колебаний (ДГК), соответствующий максимальной амплитуде мод. Параметры ДГК были настроены таким образом, чтобы уравнивать частоту демпфера с модальной частотой. Для моста с пролетом 40 м пассивный ДГК показал хороший контроль вибрации основной формы колебания балки, поскольку резонансный отклик в пределах расчетной скорости доминирует над максимальными динамическими характеристиками как моста, так и поезда. При массе ДГК всего 0,5% от массы моста максимальные вертикальные динамические характеристики моста с пролетом 40 м могут быть снижены примерно на 40 и 20% для ускорений и перемещений соответственно.

У ДГК есть один существенный минус: его чувствительность к изменениям частоты. Наличие массы динамического демпфера в основной конструкции увеличивает одну степень свободы, поэтому резонансы не устраняются, а «раздваиваются». Действительно простым и очевидным способом избегания возможности попадания указанных режимов является изменение резонансной частоты таким образом, чтобы частота возмущающей силы оставалась за пределами возможного изменения. Теоретически такое возможно путем увеличения соотношения масс демпфера и основной системы, но конструктивно это увеличит массу ДГК. Поэтому необходимо применять ДГК с малой массой. В качестве динамического гасителя колебаний малой массы можно использовать устройство с распределенными параметрами для гашения вертикальных и горизонтальных поперечных колебаний [2] (рис. 1).

Требования к вертикальному смещению пути определяют жесткость спиральных пружин динамического гасителя колебаний. Устройство, рассматриваемое в работе, предназначено для снижения динамических колебаний и включает в себя: динамический гаситель как несущий упругий элемент, представленный спиральной пружиной, установленной между основаниями; инерционную массу, установленную по оси всего устройства и присоединенную к основаниям пружинами. Инерционную массу в устройство устанавливают для изменения динамики моста при прохождении подвижного состава по пролетному строению на рабочей частоте колебаний. Динамическое взаимодействие моста и устройства возможно менять путем компенсации циклических сил и моментов, передаваемых от опор-

ных элементов, за счет сил и моментов противоположного направления с помощью внутренней инерционной массы, которая колеблется в противоположной фазе.

Такая конструкция может быть установлена либо непосредственно на пролетное строение (применительно к ВСМ), либо между опорой и балкой пролетного строения при сейсмических воздействиях (рис. 2).

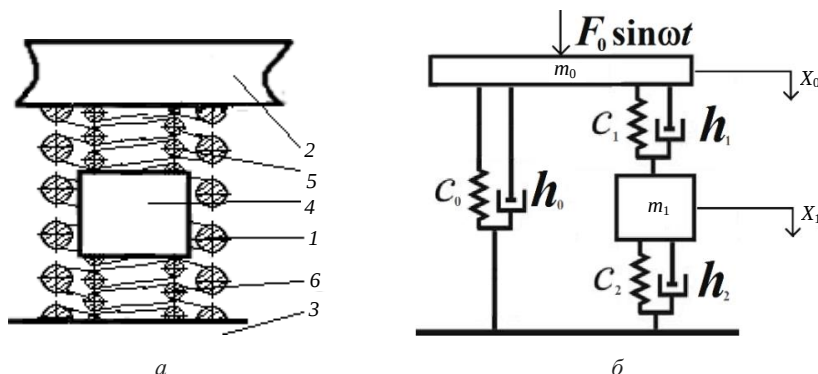


Рис. 1. Динамический гаситель колебаний (а) и его расчетная схема (б): 1 – несущий упругий элемент; 2 – пролетное строение; 3 – опора; 4 – дополнительная масса; 5, 6 – пружины; C_0 – жесткость основной несущей пружины; C_1 и C_2 – жесткости соответственно основной и добавочной пружин гасителя; h_1, h_2, h_3 – коэффициенты демпфирования; m_0, m_1 – массы балки и динамического гасителя соответственно; F_0 – внешняя сила

Fig. 1. (a) Dynamic vibration damper (DVD) and (b) calculation model of the damper: 1, elastic bearing element; 2, span structure; 3, support arrangement; 4, additional mass; and 5, 6, springs; C_0 is the stiffness of the main bearing spring; C_1 and C_2 are the stiffness of the main and additional springs of the damper, respectively; h_1, h_2, h_3 are the damping coefficients; m_0, m_1 are the mass of the beam and dynamic damper, respectively; and F_0 is the external force

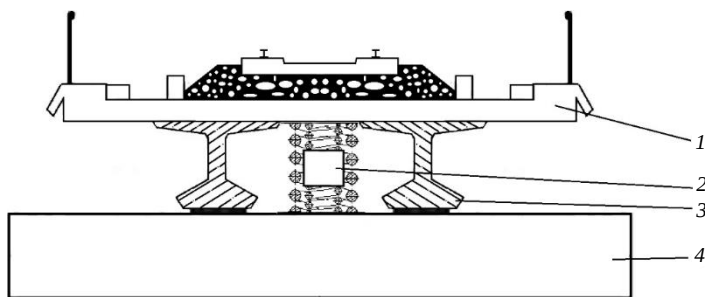


Рис. 2. Мостовое сооружение с ДГК: 1 – верхнее строение пути; 2 – динамический гаситель колебаний; 3 – балка пролетного строения; 4 – опора

Fig. 2. Bridge with a DVD: 1, upper structure of the track; 2, dynamic vibration damper; 3, span beam; and 4, support arrangement

Далее от колебаний пролетного строения возникающие переменные усилия пружины передают на основание, жесткость пружин и амплитуда их колебаний пропорциональны упругим элементам, масса будет совершать колебания в противофазе с пролетным строением от сил, передаваемых пружинами. Возникающие при деформации пружин циклические усилия будут передаваться на основа-

ние вдоль оси динамического гасителя колебаний. Если силы пружин направлены в противоположные стороны и равны по величине, то сумма переменных сил и моментов, передаваемых на основание, равна нулю.

Метод решения

Рассмотрим балку пролетного строения, которая совершает прямолинейные колебания под действием гармонической силы с амплитудой F_0 и частотой ω [2]. Примем, что $x_0(t)$ – перемещение пролетного строения в горизонтальной плоскости, а $x_1(t)$ – перемещение гасителя (см. рис. 1, а).

На основании расчетной схемы (см. рис. 1, б) дифференциальные уравнения движения системы «балка пролетного строения – динамический гаситель колебаний – опора» можно записать в виде [2]:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + (C_0 + C_1)x_0 - C_1 x_1 + (h_0 + h_1)\dot{x}_0 - h_1 \dot{x}_1 = F \sin \omega t; \\ m_1 \ddot{x}_1 - C_1 x_0 + (C_1 + C_2)x_1 + (h_1 + h_2)\dot{x}_1 - h_1 \dot{x}_0 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для решения этой системы дифференциальных уравнений и исследования колебаний можно использовать метод комплексных амплитуд [3], но для динамического поведения сложных систем удобнее применить структурный метод. Структурный метод для анализа и синтеза исследования колебательных процессов использует структурные схемы в соответствии с теорией автоматического управления [4].

Расчетную схему ДГК (см. рис. 1, б) переводим в структурную схему (рис. 3), предварительно переписав уравнения системы (1) в систему уравнений в оперативной форме:

$$\begin{cases} (T_0^2 p^2 + T_0 q_0 p + 1) \cdot x_0(p) - (T_0 q_0 p + T_0^2 \frac{C_1}{m_0}) \cdot x_1(p) = F(p); \\ (T_1^2 p^2 + T_1 q_1 p + 1) \cdot x_1(p) - \frac{1}{\mu \vartheta} (T_1 q_{01} p + T_0^2 \frac{C_1}{m_0} \vartheta) \cdot x_0(p) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где $\mu = \frac{m_1}{m_0}$ – отношение масс гасителя и основной системы; $p = \frac{d}{dt}$ – оператор

дифференцирования; $T_0 = \frac{1}{\omega_0}$ – постоянная времени исследуемой системы;

$T_1 = \frac{1}{\omega_1}$ – постоянная времени динамического гасителя колебаний; $\vartheta^2 = \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2}$ –

настройка гасителя; $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{m_0}}$ – собственная частота основной системы без

гасителя; $\omega_1 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m_1}}$ – парциальная частота гасителя; $q_0 = \frac{2(h_0 + h_1)}{h_{0кр}}$,

$q_1 = \frac{2(h_1 + h_2)}{h_{1кр}}$ – относительные коэффициенты трения; $h_{0кр} = 2m_0\omega_0$, $h_{1кр} = 2m_1\omega_1$ –

безразмерные коэффициенты демпфирования.

В соответствии с системой уравнений (2) структурная схема мостового сооружения с динамическим гасителем колебаний, применяемым для гашения колебаний пролетного строения от возмущающей силы $F(p)$, будет иметь вид, представленный на рис. 3 [5].

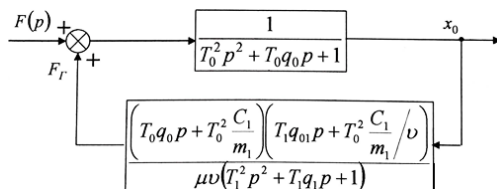


Рис. 3. Схема устройства с ДГК (вход – возмущающая сила, выход – сигнал)

Fig. 3. Diagram of the device with a DVD (in – exciting force, out – signal)

Оптимальное гашение колебаний мостового сооружения происходит в том случае, когда ДГК настроен таким образом, что коэффициент $\vartheta = 1$. Введем коэффициент $k = T_0^2 \frac{C_1}{m_1}$, тогда схема на рис. 3 преобразуется в структурную схему с типовыми динамическими звеньями (рис. 4).

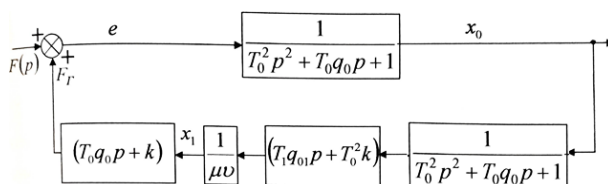


Рис. 4. Преобразованная схема

Fig. 4. Modified diagram

В качестве ошибки регулирования e в этой схеме рассматривается разность между возбуждением $F(p)$ и реакцией динамического гасителя F_r . Масса динамического гасителя должна составлять не более 5% от массы пролетного строения, а величины значений жесткостей C_1 и C_2 , обеспечивающие частотную настройку ДГК, во многом зависят от величины жесткости C_0 [6].

Исследования динамических характеристик мостового сооружения с ДГК, структурная схема которого представлена на рис. 4, проводились на ЭВМ с применением пакета моделирования simulink. Для определения переходных процессов системы и ее устойчивости на различных частотах была использована схема, приведенная на рис. 5 [6].

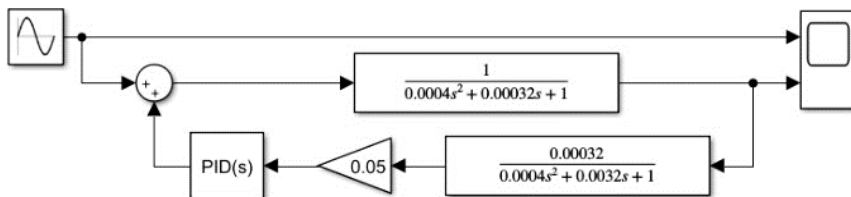


Рис. 5. Схема исследуемого устройства

Fig. 5. Diagram of the test device

При моделировании системы с динамическим гасителем колебаний приняты следующие параметры:

- масса объекта защиты $m_0 = 1\,000$ кг;
- масса присоединенного динамического гасителя колебаний $m_1 = 50$ кг;
- относительные коэффициенты трения: $q_0 = 0,016$ и $q_1 = 0,016$.

Выбор жесткостей пружин устройства ДГК производился из условия, что обеспечивается устойчивость работы мостового сооружения при действии на него динамической нагрузки. Следовательно, для определения работоспособности предложенного динамического гасителя с распределенными параметрами в мостовых сооружениях необходимо задавать различные динамические режимы.

Выбираем массу гасителя m_1 для заданной массы защищаемого объекта m_0 и его собственной частоты ω_0 . Определяем коэффициент масс объекта и гасителя по величине коэффициента связи с учетом устойчивости системы [3]. Жесткость C_1 основной пружины гасителя колебаний для заданной (настроенной) частоты находим по формуле

$$C_1 = k \cdot m_1 \cdot \omega_n^2. \quad (3)$$

Жесткость C_2 дополнительной пружины гасителя

$$C_2 = m_0 \cdot \omega_n^2 - C_1. \quad (4)$$

Исследования динамического поведения массы m_1 системы «мостовое сооружение – ДГК малой массы» производились при фиксированных значениях частоты возмущающей силы 12, 22, 32, 62 и 100 рад/с. Результаты моделирования для частоты 12 рад/с приведены в таблице.

Параметры динамического поведения при значениях частоты возмущающей силы 12 рад/с

C_0 , Нм	C_1 , Нм	C_2 , Нм	k	Мах амплитуда	Перерегулирование, %	Постоянная времени системы, с	Устойчивость системы
9 720	4 680	–3 960	6,5	–	–	0,15	Нет
11 180	3 220	–2 500	4,47	–	–	0,15	Да
11 230	3 170	–2 450	4,4	41,1	31,5	0,15	Да
11 520	2 880	–2 160	4	8,01	60	0,15	Да
14 400	0	720	0	1,97	97,3	0,15	Да
17 280	–2 880	3 600	–4	7,98	59,5	0,15	Да
17 570	–3 170	3 890	–4,4	40,8	30,3	0,15	Да
17 620	–3 220	3 940	–4,47	–	–	0,15	Да
19 080	–4 680	5 400	–6,5	–	–	0,15	Нет

Анализируя полученные данные, видим, что по коэффициенту связи k можно оценивать общие закономерности динамического поведения системы на различных возмущающих частотах. При значениях жесткости $C_1 = 0$ и коэффициента связи $k = 0$ колебания массы динамического гасителя минимальны, при значениях $|k| = 4,4$ максимальны, а перерегулирование уменьшается, т.е. наблюдается более качественное гашение колебаний. При величине модуля коэффициента $|k| \leq 4,4$ переходный процесс в системе носит колебательный характер, причем динамическая устойчивость системы наступает через небольшой промежуток времени [5]. Это утверждение иллюстрируется на рис. 6–10, где представлены

реакции системы при разных значениях частоты возмущающей силы. При значениях $|k| > 6.4$ система всегда неустойчива, при $4.47 < k < 6.4$ переходный процесс апериодический.

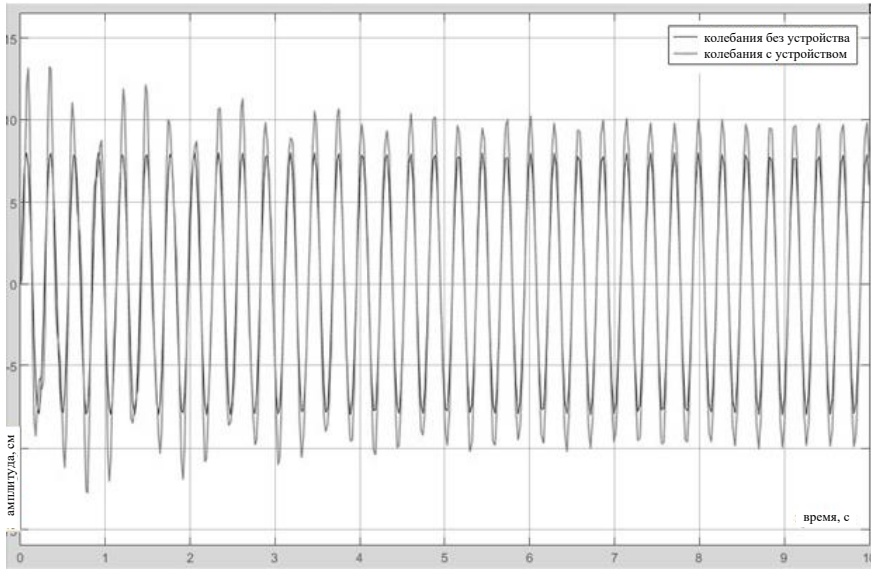


Рис. 6. Реакция системы на возмущающий сигнал частотой 12 рад/с
Fig. 6. Response of the system to a disturbance signal with a frequency of 12 rad/s

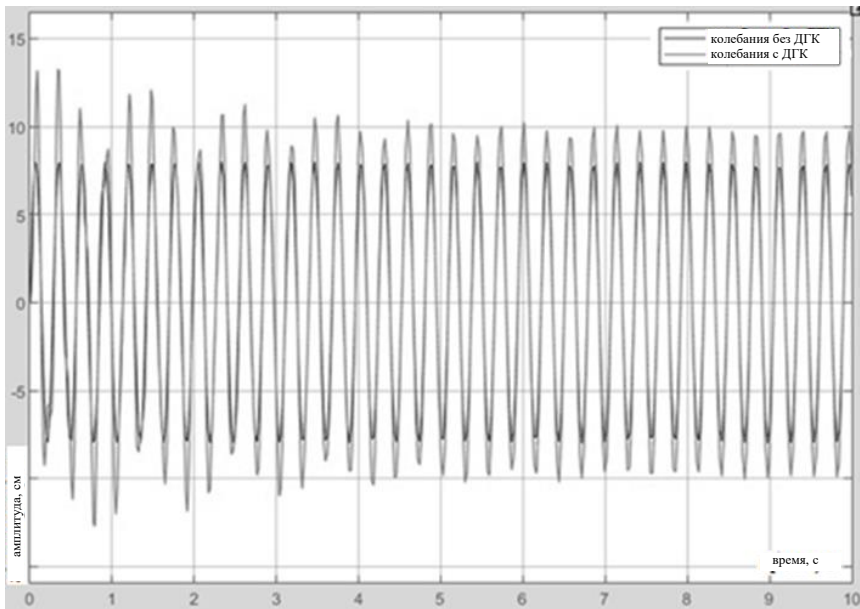


Рис. 7. Реакция системы на возмущающий сигнал частотой 22 рад/с
Fig. 7. Response of the system to a disturbance signal with a frequency of 22 rad/s

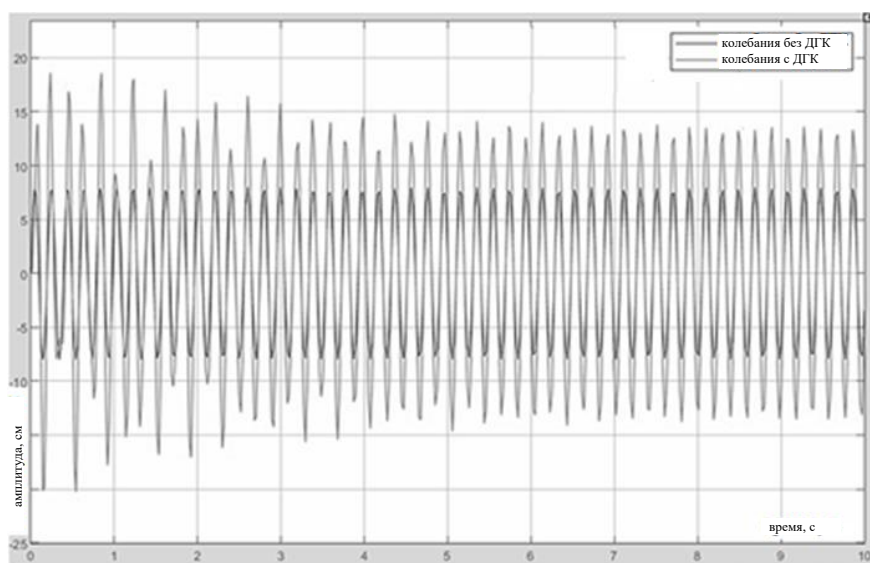


Рис. 8. Реакция системы на возмущающий сигнал частотой 32 рад/с

Fig. 8. Response of the system to a disturbance signal with a frequency of 32 rad/s

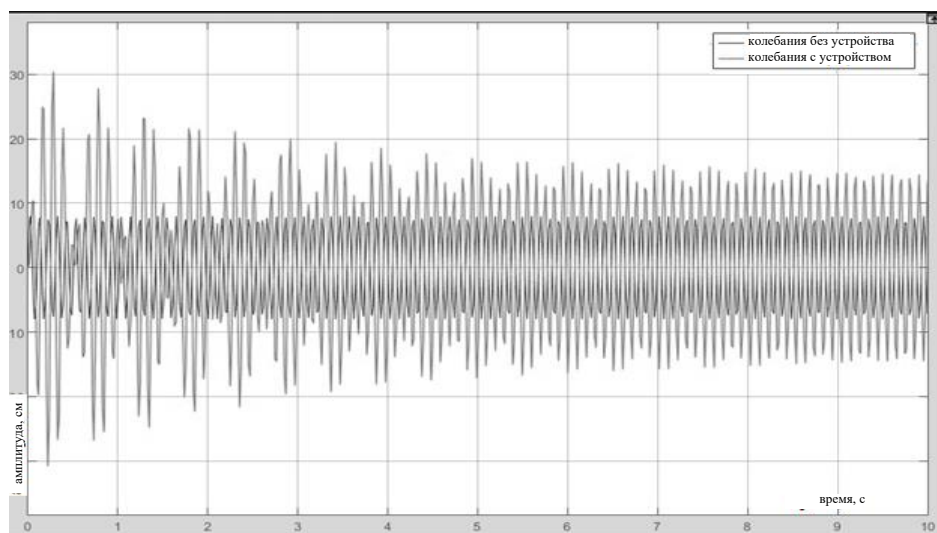


Рис. 9. Реакция системы на возмущающий сигнал частотой 62 рад/с

Fig. 9. Response of the system to a disturbance signal with a frequency of 62 rad/s

Из приведенных данных следует, что амплитуда и область неустойчивости мостового сооружения (до 5 с) без ДГК при возмущении сигнала частотами 12–62 рад/с различаются незначительно, при этом наблюдается снижение амплитуды колебаний до 5 с, а после 5 с параметры системы стабилизируются и система становится устойчивой. Мостовое сооружение с ДГК на частотах 12–32 рад/с практически с начала воздействия возмущающей силы устойчиво, амплитуды

колебаний меньше, чем без ДГК, и в зоне неустойчивости (до 5 с) это различие является более существенным. При рассмотрении динамики системы с частотой возмущающей силы 62 рад/с (см. рис. 9) видно, что колебания системы до 4 с имеют незначительные изменения частоты, это объясняется изменением частоты ДГК, но при этом амплитуда колебаний всей системы остается постоянной и значительно меньше, чем системы без ДГК [5].

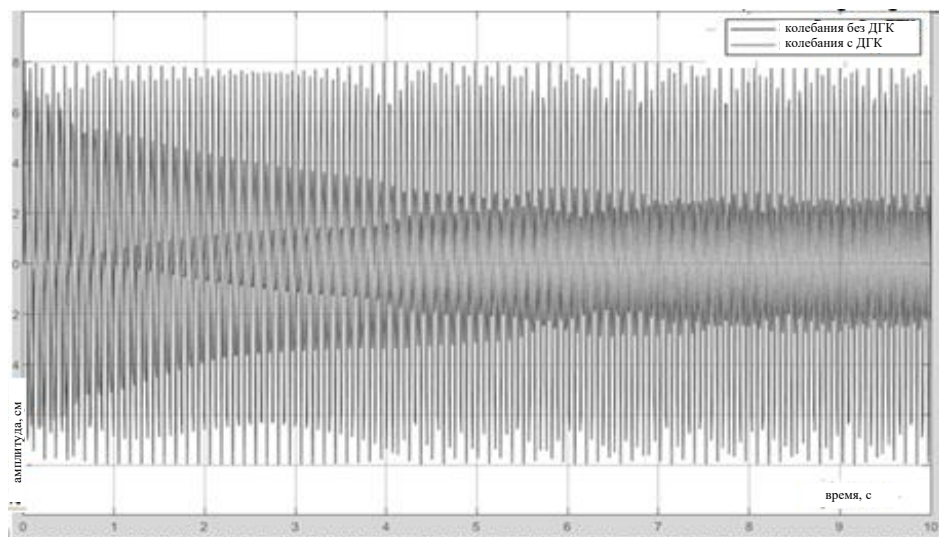


Рис. 10. Реакция системы на возмущающий сигнал частотой 100 рад/с
Fig. 10. Response of the system to a disturbance signal with a frequency of 100 rad/s

Из результатов, приведенных на рис. 10, следует, что при такой частоте возмущающей силы динамическое поведение мостового сооружения без ДГК носит синусоидальный характер больших амплитудных значений. Динамическое поведение системы с ДГК характеризуется меньшими значениями амплитуды в первую секунду, и система находится в зоне неустойчивости, затем значения амплитуды снижаются, а колебания с 5 с становятся устойчивыми благодаря включению в работу пружины с жесткостью C_2 . При этом динамические колебания всей системы значительно снижены.

Заключение

Из приведенных данных следует, что амплитуда и область неустойчивости мостового сооружения (до 5 с) без ДГК при возмущении сигнала частотами 12–62 рад/с различаются незначительно, при этом наблюдается снижение амплитуды колебаний до 5 с, а после 5 с параметры системы стабилизируются и система становится устойчивой. Мостовое сооружение с ДГК на частотах 12–32 рад/с практически с начала воздействия возмущающей силы устойчиво, амплитуды колебаний меньше, чем без ДГК, и в зоне неустойчивости (до 5 с) это различие является более существенным. При рассмотрении динамики системы с частотой возмущающей силы 62 рад/с видно, что колебания системы до 4 с имеет незначительное изменение частоты, это объясняется изменением частоты ДГК, но при

этом амплитуда колебаний всей системы остается постоянной и значительно меньшей, чем системы без ДГК. Из результатов, приведенных на рис. 10, следует, что с такой частотой возмущающей силы динамическое поведение мостового сооружения без ДГК носит синусоидальный характер больших амплитудных значений. Динамическое поведение системы с ДГК характеризуется меньшими значениями амплитуды в первую секунду, и система находится в зоне неустойчивости, затем значения амплитуды снижаются, а колебания с 5 с становятся устойчивыми благодаря включению в работу пружины с жесткостью C_2 . При этом динамические колебания всей системы значительно снижены.

Список источников

1. Wang J.F., Lin C.C., Chen B.L. Vibration suppression for high-speed railway bridges using tuned mass dampers // *International Journal of Solids and Structures*. 2003. V. 40 (2). P. 465–491.
2. Provornaya D., Glushkov S., Solovyev L. Damping of vertical and horizontal transverse vibrations in the bridge span structures // *MATEC Web of Conferences*. 10th International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”, PTS 2018. 2018. V. 216 (8). Art. 01015.
3. Бурьян Ю.А., Ситников Д.В. Изучаемая вибрационная мощность в колебательной системе // *Динамика систем механизмов и машин*. 2018. № 1. С. 1–10.
4. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. М. : Наука, 1966. 338 с.
5. Попов И.П. Символическое представление вынужденных колебаний разветвленных механических систем // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2021. № 72. С. 118–130. doi: 10.17223/19988621/72/10
6. Жаров А.В. Разработка управляемой виброгасящей системы для подвесок судовых двигателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.08.05. Новосибирск, 2005. 157 с.

References

1. Wang J.F., Lin C.C., Chen B.L. (2003) Vibration suppression for high-speed railway bridges using tuned mass dampers. *International Journal of Solids and Structures*. 40(2). pp. 465–491. doi: 10.1016/S0020-7683(02)00589-9
2. Provornaya D., Glushkov S., Solovyev L. (2018) Damping of vertical and horizontal transverse vibrations in the bridge span structures. *MATEC Web of Conferences*. 10th International Scientific and Technical Conference "Polytransport Systems". 216(8). Article 01015. doi: 10.1051/mateconf/201821601015
3. Burian Yu.A., Zubarev A.V., Sitnikov D.V. (2018) Emitted vibrational power in an oscillating system with an electrodynamic compensator. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 1. pp. 27–32.
4. Popov E.P. (1966) *Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie* [Automatic regulation and control]. Moscow: Nauka.
5. Popov I.P. (2021) *Simvolicheskoe predstavlenie vynuzhdennykh kolebaniy razvetvlennykh mekhanicheskikh sistem* [Symbolic representation of forced oscillations of branched mechanical systems]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 72. pp. 118–130. doi: 10.17223/19988621/72/10
6. Zharov A.V. (2005) *Razrabotka upravlyaemoy vibrogasyashchey sistemy dlya podvesok sudovykh dvigateley* [Development of the controlled vibration isolation system for ship engine suspensions]. Ph.D. thesis, Novosibirsk.

Сведения об авторах:

Глушков Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и эксплуатации машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (Новосибирск, Россия). E-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Молокова Наталья Владимировна – старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели» Сибирского государственного университета путей сообщения (Новосибирск, Россия). E-mail: molokovada@gmail.com

Проворная Дарья Андреевна – преподаватель кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения (Новосибирск, Россия). E-mail: provornayadarya@yandex.ru

Information about the authors:

Glushkov Sergey P. (Doctor of Technical Sciences, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Molokova Natal'ya V. (Senior Lecturer, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: molokovada@gmail.com

Provornaya Dar'ya A. (Lecturer, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: provornayadarya@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 09.07.2023; принята к публикации 07.02.2025

The article was submitted 09.07.2023; accepted for publication 07.02.2025