

Научная статья

УДК 62-752.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

EDN: DJUFWK



ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВИБРОЗАЩИТЫ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В.И. Кочергин ✉, **С.П. Глушков**, **Д.Э. Абраменков**

Сибирский государственный университет путей сообщения,

г. Новосибирск, Россия

vkplus2011@yandex.ru

✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Увеличение интенсивности дорожного движения и перспективы развития высокоскоростного железнодорожного транспорта требуют решения проблемы эффективности виброзащиты объектов транспортной инфраструктуры путем разработки инновационных решений. В настоящее время вопросы борьбы с вибрацией по отношению к пролетным сооружениям мостов и путепроводов являются недостаточно изученными. Цель работы – исследование перспективных направлений виброзащиты мостовых сооружений на основе применения динамических гасителей колебаний.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели исследования и реализации эффективных технических решений в области виброзащиты мостовых сооружений предлагается усовершенствованная конструкция динамического гасителя колебаний, в которой инерционная масса закреплена на двух пружинах, верхняя из которых связана с защищаемой от вибрации конструкцией, а нижняя пружина – с основанием или фундаментом объекта. Гашение колебаний при этом производится за счет колебаний в противофазе свободным и вынужденным колебаниям защищаемого от вибраций объекта вспомогательных инерционных масс. Данное техническое решение позволяет уравновесить силы упругого взаимодействия демпфирующего устройства и защищаемого от вибрации объекта и моменты от этих сил.

Результаты. В результате выполнения экспериментальных исследований установленного на вибростенде макетного образца усовершенствованного динамического гасителя колебаний установлено, что уровни вибрации по всем направлениям существенно снизились, в том числе в вертикальном направлении в 5,7 раз.

Обсуждение и заключение. Полученные положительные результаты экспериментов и относительная простота предлагаемой конструкции позволяют предложить данный метод виброзащиты пролетных строений как для вновь проектируемых, так и для уже находящихся в эксплуатации объектов. Особенно важным является минимизация возможности возникновения резонансных явлений и галопирования. Результаты исследования позволяют в перспективе обеспечить эффективность виброзащиты колеблющихся машин, механизмов и объектов инфраструктуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибрация, виброускорение, виброзащита, демпфирование, виброизолятор, мост, путепровод, пролетное строение, гаситель колебаний, инерционная масса

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение рецензентам, работавшим с данной статьей.

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. **Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: Кочергин В.И., Глушков С.П., Абраменков Д.Э. Применение динамических гасителей колебаний для виброзащиты мостовых сооружений // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 960-971. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

© Кочергин В.И., Глушков С.П., Абраменков Д.Э., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

EDN: DJUFWK

APPLICATION OF DYNAMIC VIBRATION DAMPERS FOR VIBRATION PROTECTION OF BRIDGE STRUCTURES

Victor I. Kochergin ✉, Sergey P. Glushkov, Dmitrij E. Abramnikov

Siberian Transport University,

Novosibirsk, Russia

vkplus2011@yandex.ru

✉ corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The increase in traffic intensity and the prospects for the development of high-speed railway transport require solving the problem of the effectiveness of vibration protection of transport infrastructure facilities by developing innovative solutions. Currently, the issues of combating vibration in relation to the span structures of bridges and overpasses are insufficiently studied. The purpose of the work is to study the promising directions of vibration protection of bridge structures based on the use of dynamic vibration dampers.

Research methodology. To achieve the goal of research and implementation of effective technical solutions in the field of vibration protection of bridge structures improved design of dynamic vibration damper is proposed in which inertial mass is fixed on two springs, upper of which is connected to structure protected from vibration, and lower spring - to base or foundation of object. Oscillations are damped due to oscillations in antiphase due to free and forced oscillations of auxiliary inertial masses protected from vibrations. This technical solution makes it possible to balance forces of elastic interaction of damping device and object protected against vibration and moments from these forces.

Results. As a result of experimental studies of the prototype of the improved dynamic vibration damper installed on the vibration stand, it was found that the vibration levels in all directions significantly decreased, including in the vertical direction by 5.7 times.

Discussion and conclusion. The obtained positive results of experiments and the relative simplicity of the proposed design make it possible to propose this method of vibration protection of superstructures for both newly designed and already in operation facilities. It is especially important to minimize the possibility of resonant phenomena and pitching. The results of the study will make it possible in the future to ensure the effectiveness of vibration protection of oscillating machines, mechanisms and infrastructure facilities.

KEYWORDS: vibration, vibration acceleration, vibration protection, damping, vibration isolator, bridge, overpass, superstructure, vibration damper, inertial mass

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude for the hard work and expert opinion of the reviewers who worked with this article.

The article was submitted: 23.10.2024 approved after reviewing: 02.12.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Kochergin V.I., Glushkov S.P., Abramnikov D.E. Application of dynamic vibration dampers for vibration protection of bridge structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 960-971. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

© Kochergin V.I., Glushkov S.P., Abramnikov D.E., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Вибрации, вызванные работой машин и механизмов или движением подвижного состава автомобильного и железнодорожного транспорта, при продолжительном воздействии не только негативно влияют на самочувствие и здоровье людей, но и наносят существенный вред объектам инфраструктуры, поэтому в настоящее время развиваются методы виброзащиты фундаментов зданий и сооружений [1]. Особое значение решение данной проблемы путем разработки инновационных решений приобретает в связи с повышением интенсивности дорожного движения, развития метрополитенов и перспективных планов развертывания высокоскоростной сети железных дорог. Помимо защиты фундаментов от вибрации актуальным и малоизученным вопросом является вибрационная защита мостовых сооружений.

Многочисленные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в трудах российских и зарубежных ученых, подтверждают, что при проезде транспортных средств в дорожных конструкциях автомобильных дорог по причине наличия неровностей дорожных покрытий возникают вынужденные колебания. Они вызывают знакопеременные вертикальные перемещения дорожной одежды, приводящие в свою очередь к возникновению свободных затухающих колебаний. Данная проблема представляет научный интерес и требует поиска путей уменьшения отрицательного воздействия вибраций [2, 3, 4, 5]. Совместное влияние динамической нагрузки от проезжающих автомобилей и периодического изменения климатических показателей может служить причиной появления изгибающих и растягивающих напряжений во всех слоях дорожной одежды и возникновения трещин в том случае, когда растягивающие напряжения в слоях дорожного полотна выше допустимых значений прочностных характеристик растяжения материалов дорожного покрытия [6]. При этом вид и техническое состояние дорожного покрытия существенно влияют на уровень распространяющихся в окружающую среду вибраций, особенно увеличивающихся при движении большегрузных автомобилей. Вибрационные воздействия не только вызывают повреждение дорожного покрытия, но также ввиду влияния неровностей дороги на продолжительность контакта между колесом транспортного средства и дорожным покрытием оказывают влияние на из-

нос шин подвижного состава автомобильного транспорта и безопасность движения [7, 8].

Аналогичным образом необходимо бороться с возникновением вибраций и шума и при развитии железнодорожной инфраструктуры. Локальные неровности железнодорожного пути оказывают динамическое вибрационное воздействие на прилегающий грунт и строительные конструкции зданий, приводят к дискомфорту пассажиров, а также сокращают срок службы путей и подвижного состава и в некоторых случаях могут приводить к авариям [9]. При этом если для создания математической модели динамического деформирования конструкции автомобильных дорог под воздействием подвижной нагрузки преимущественно рассматриваются плоские элементы, обладающие определенными вязкоупругими свойствами, то для оценки динамического поведения верхнего строения железнодорожного пути возможно его представление как плоского элемента для без балластных путей [10] либо анализ динамических реакций шарнирно опертой балки от действия совокупности сосредоточенных сил, представляющих собой общий вес состава, приведенного к отдельным колесным парам [9]. Длительное нагружение рельсового пути как механической системы сопровождается накоплением повреждений элементов колебательной системы, при этом учет влияния вибрационных процессов, сопровождающих взаимодействие железнодорожного пути и колесных пар, должен основываться на анализе случайного характера колебательных процессов.

Вопросы борьбы с вибрацией по отношению к пролетным сооружениям мостов и путепроводов в настоящее время являются недостаточно изученными. Доказано, что существенное увеличение нагрузок на мосты по сравнению с проектными значениями при современной интенсивности движения приводит к увеличению вибраций, снижению усталостной прочности металла и появлению дефектов в пролетных строениях, связанных с образованием трещин, сколов, уменьшением рабочей площади значимых элементов и т. д., но исследования в области прогрессирующих разрушений мостовых сооружений в широком объеме практически не проводятся [11]. Известные методы определения месторасположения и параметров раскрытия трещин пролетных конструкций, основанные на анализе изменения частотных характеристик собственных колебаний моста под воздействием вибрационных нагрузок, как прави-

ло, не предполагают разработку проектных и конструктивных решений по минимизации негативного воздействия вибраций [12, 13]. В связи с этим целью данной работы является исследование перспективных направлений виброзащиты мостовых сооружений на основе применения динамических гасителей колебаний.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: обосновать необходимость обеспечения вибрационной защиты мостовых сооружений и определить приоритетные стратегические направления теоретических и экспериментальных исследований совершенствования методов виброзащиты объектов инфраструктуры; оценить основные технические противоречия, характерные для использования демпфирующих виброзащитных устройств, и предложить пути их устранения; разработать усовершенствованную конструкцию динамических гасителей колебаний и выполнить экспериментальные исследования эффективности применения динамических гасителей колебаний; определить основные направления дальнейших исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические и экспериментальные исследования совершенствования методов виброзащиты объектов инфраструктуры должны обладать некоторой степенью универсальности, то есть быть пригодными как при проектировании новых мостовых сооружений, так и для модернизации эксплуатируемых мостов. В первую очередь к таким перспективным направлениям относится использование различных методов демпфирования, в настоящее время недостаточно широко используемых в мостостроении. Наиболее целесообразным при этом является применение пассивных систем виброзащиты, в качестве которых могут выступать упругие виброизоляторы либо вязкостные амортизаторы, причем опыт эксплуатации классических упругих виброизоляторов на основе резиновых или полимерных упругих элементов показал, что они сложны в настройке на заданный диапазон вынужденных колебаний и обладают недостаточной эксплуатационной надежностью. Вязкостные характеристики демпфирующей жидкости гидравлических амортизирующих устройств позволяют рассеивать энергию колебаний защищаемой конструкции и генерировать колебания демпфера, не совпадающие по фазе с входным смещением [14]. Однако ряд недо-

статков гидравлических систем виброзащиты (большие трудозатраты на обеспечение надежной эксплуатации, зависимость от температурных условий и сейсмической активности) не позволяют обеспечить широкие перспективы их практического применения. С точки зрения надежности, удобства обслуживания и экономической эффективности наиболее перспективным следует считать разработку методов снижения вибрационной нагрузки путем использования пружинных динамических гасителей колебаний (ДГК), представляющих собой колеблющиеся совместно с основными демпфирующими упругими элементами подвешенные на пружинах инерционные массы. Гашение колебаний при этом производится за счет колебаний в противофазе свободным и вынужденным колебаниям виброзащищаемого объекта вспомогательных инерционных масс, составляющих от 5 до 20% массы защищаемой системы. Наиболее известным ранним успешным опытом применения таких устройств для уменьшения сильных колебаний лондонского пешеходного моста была гибридная система, состоящая из пассивного вязкостного демпфера и ДГК [15].

Для эффективного гашения динамических откликов мостовых конструкций динамическими гасителями колебаний необходима оптимизация параметров диапазона их рабочих частот и величины коэффициента демпфирования, а также обеспечение невыхода колебательной системы в резонансный режим [16]. Примером использования оптимально настроенной системы динамических гасителей колебаний может являться мост в г. Волгограде, где по результатам расчетов форм собственных колебаний пролетных строений в середине каждого пролета установлены адаптивные массовые демпферы [17].

В идеале виброзащитное устройство должно обладать двумя противоречивыми свойствами: иметь минимальную жесткость для надежной защиты от вибраций и одновременно обладать достаточной суммарной жесткостью в целях гарантированного обеспечения ограничения перемещений защищаемого от вибрации объекта. В итоге сумма сил упругого взаимодействия демпфирующего устройства и виброзащищаемой конструкции, а также сумма моментов данных сил по отношению ко всем трем осям координат, должны уравновешиваться в любой текущий момент времени при работе виброзащиты в заданном диапазоне рабочих частот колебаний. Наиболее полно данным условиям могут удовлетворять вибро-

защитные системы, обладающие характеристиками так называемой квазиулевого жесткости, то есть демпферы или иные устройства, имеющие в силовых характеристиках горизонтальные участки суммарной жесткости, стремящейся к нулю. Данные типы виброзащитных устройств получают в последнее время широкое распространение в различных сферах, начиная защитой от вибраций операторов машин и механизмов и заканчивая виброизоляцией энергетических установок и инфраструктурных объектов [18, 19, 20, 21, 22].

Динамические гасители колебаний также следует отнести к устройствам данного типа, однако традиционные конструкции ДГК в виде подвешенного на пружине груза обладают рядом недостатков, заключающихся в сложности подбора параметров гасителей колебаний в целях избежания попадания в диапазон резонансных частот. Это связано с тем, что на переходных режимах возможно развитие амплитуд колебаний инерционной массы гасителя, в том числе в перпендикулярных вектору основных колебаний направлениях, превышающих их значения в рабочей зоне. В связи с этим предлагается для защиты от вибраций машин, механизмов и пролетных строений усовершенствованная конструкция ДГК, где инерционная масса закреплена на двух пружинах, верхняя из которых связана с защищаемой от вибрации конструкцией, а вторая, нижняя пружина, – с основанием или фундаментом объекта.

Расчетная схема предлагаемой конструкции динамического гасителя колебаний приведена на рисунке 1, где C_1 и C_2 – величины жесткости верхней и нижней пружин инерционной массы; h_1 , h_2 , h_3 – коэффициенты демпфирования; m_0 и m_1 – соответствующие значения масс защищаемого от вибрации объекта и дополнительной инерционной массы ДГК; F_0 – внешнее усилие, вызывающее возникновение колебаний; y_0 и y_1 – амплитуды перемещений объекта защиты и инерционной массы ДГК. Такое техническое решение обеспечивает благодаря колебаниям в противофазе инерционной массы при совместном движении всех элементов колебательной системы эффективное гашение колебаний и гарантированную компенсацию суммарной жесткости упругих элементов при виброзащите различных машин и механизмов [23].

Данный подход может обеспечить эффективную защиту от вибраций и по отношению к пролетным строениям мостов и путепроводов. В этом случае для снижения вибрации между настилом моста и опорами необходима установка набора динамических гасителей

колебаний предлагаемой конструкции, позволяющих синхронно передавать воздействующие на верхнюю пружину ДГК усилия через периодические усилия деформации нижней пружины на основание или фундамент виброизолирующего устройства. При этом если рассматривать пролетное строение как лежащую на опорах балку с наличием эксцентриситета опор, то при отклонениях конструкции моста в процессе движения по нему подвижного состава данный эксцентриситет может привести к вращению краев балки и, как следствие, возникновению дополнительных силовых воздействий в горизонтальном направлении. Это означает, что в идеале ДГК следует размещать таким образом, чтобы оси крепления демпферов пересекались как можно ближе к центру масс балки моста с целью совмещения центра тяжести моста и оси воздействия демпфирующих усилий [24].

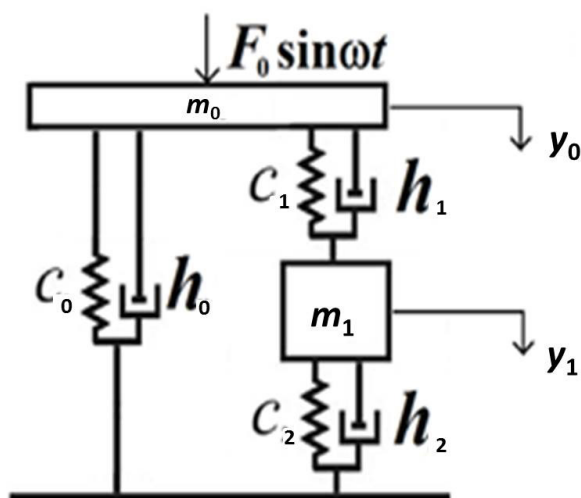


Рисунок 1 – Расчетная схема предлагаемой конструкции динамического гасителя колебаний
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Design diagram of the proposed design of the dynamic vibration damper
Source: compiled by the authors.

На рисунке 2 приведен один из вариантов схемы размещения системы гасителей колебаний мостового сооружения [24]. Здесь C_d – коэффициент демпфирования; e – эксцентриситет опор; x_d и y_d – горизонтальные и вертикальные координаты положения ДГК; $F_r(t)$ и $F_{r\pm 1}(t)$ – силовые воздействия в горизонтальном направлении вследствие перемещения нагрузки по r -й оси при движении поезда со скоростью v ; Y – центр масс балки моста.

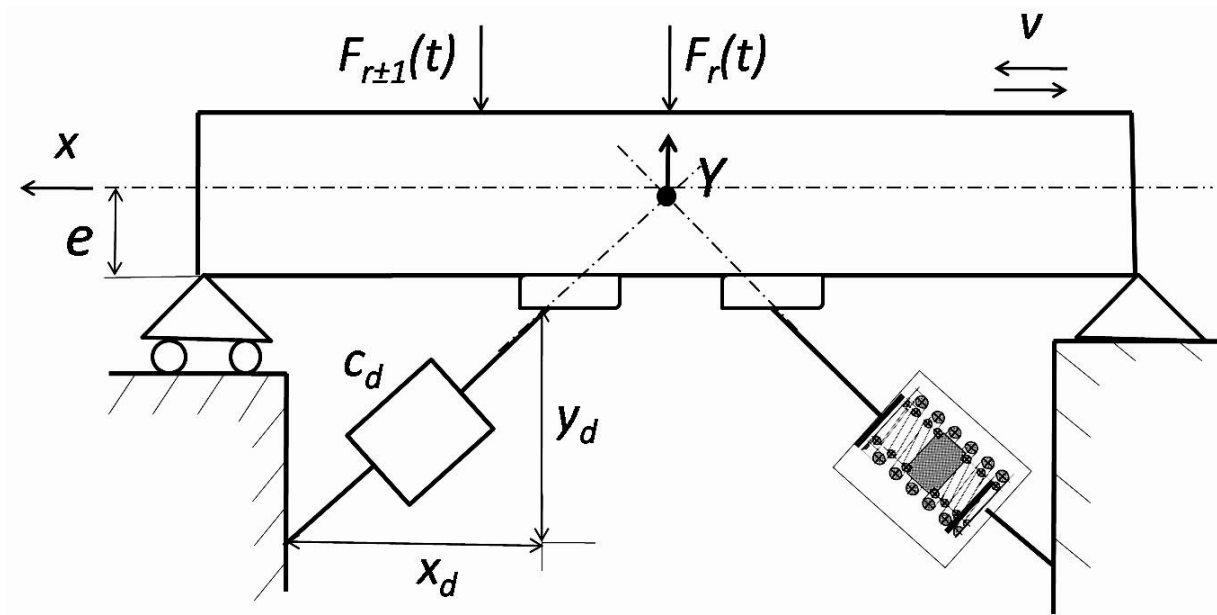


Рисунок 2 – Схема размещения системы гасителей колебаний мостового сооружения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 –Layout of the bridge structure vibration damper system
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная установка, общий вид которой представлен на рисунке 3, представляет собой макетный образец динамического гасителя колебаний с четырьмя основными пружинными демпфирующими элементами и дополнительной инерционной подпружиненной массой, установленного на вибростенде. Роль объекта защиты (например, пролетного строения моста) здесь выполняет металлический прямоугольный стол, а источником возбуждения вибрации является вибростенд, стол которого может колебаться от движения эксцентрика, связанного с движением ременной передачи от трехфазного асинхронного двигателя.

Масса груза при проведении экспериментов составляла 20 кг, жесткость основных (несущих) пружин $C_0 = 6,12$ кН/м, жесткость верхней пружины подвески инерционной массы $C_1 = 0,93$ кН/м, нижней $C_2 = 0,47$ кН/м. В экс-

периментальной установке использовались 4 несущие пружины, следовательно, суммарная жесткость основных упругих элементов ΣC_0 равняется 24,48 кН/м.

Эффективность снижения колебаний виброзащитным устройством в стационарных режимах определяется коэффициентом виброизоляции, характеризующим долю передаваемого динамического воздействия от возмущающей нагрузки на защищаемую конструкцию. Необходимая величина коэффициента виброизоляции μ обеспечивается подбором характеристик жесткости упругих элементов и может быть определена на основании следующей зависимости:

$$\mu = \sqrt{\frac{1 + 4\gamma^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}{\left[1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2\right]^2 + 4\gamma^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}}$$



Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – General view of the pilot plant
Source: compiled by the authors.

В приведенном выражении $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{m_0}}$ – частота собственных колебаний мостового сооружения с установленным ДГК; $\omega = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m_1}}$ – частота свободных колебаний динамического гасителя; γ – коэффициент демпфирования.

Измерения вибрационных характеристик проводились с помощью анализатора шума и вибраций «АССИСТЕНТ» (сертификат RU.C.36.002.A № 34059). Фиксировались уровни виброускорений локальной вибрации V_{ha} по осям Z, Y, X в дБ в октавных полосах от 8 до 1000 Гц, полученные логарифмические значения уровней виброускорений в дБ впоследствии переводились в m/s^2 . Усредненные результаты измерений во временном интервале от начала вибрационного процесса до его затухания после выключения вибростенда, сопровождающегося резонансными явлениями, представлены в таблице.

Измерения уровней локальной вибрации в процессе проведения экспериментов про-

изводились в трех режимах: с основными пружинными элементами без ДГК; с инерционной массой ДГК, подвешенной только на верхней пружине; с инерционной массой ДГК, закрепленной на верхней и нижней пружинах. Усредненные результаты измерений во временном интервале от начала вибрационного процесса до его затухания после выключения вибростенда, сопровождающегося резонансными явлениями, представлены в таблице.

Установлено, что уровни локальных значений виброускорений при использовании динамического гасителя существенно снижаются. При этом вибрации в вертикальном направлении по оси Z, что особенно важно для обеспечения виброзащиты объектов инфраструктуры, выраженные в m/s^2 , снизились при использовании ДГК с подвешенной на одной верхней пружине инерционной массой в 1,5 раза, а в случае установки инерционной массы на верхней и нижней дополнительной пружине уже в 5,7 раз.

Таблица

Результаты измерения локальных уровней виброускорения

Источник: составлено авторами.

Table

Results of measurement of local vibration acceleration levels

Source: compiled by the authors.

Режим измерения вибрации	V _{naZ}		V _{naY}		V _{naX}	
	дБ	м/с ²	дБ	м/с ²	дБ	м/с ²
Без ДГК	115,7	0,63	114,5	0,53	111,4	0,37
ДГК с верхней пружиной инерционной массы	112,3	0,42	114,4	0,52	114,2	0,52
ДГК с верхней и нижней пружинами инерционной массы	100,9	0,11	93,7	0,048	98,6	0,085

ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение интенсивности движения автомобильного и железнодорожного транспорта в сочетании с недостаточным качеством дорожных покрытий и рельсовых путей вызывают острую необходимость анализа параметров возникающих при движении подвижного состава вибраций и разработки технических мероприятий по борьбе с их негативным влиянием на объекты инфраструктуры. Особенно важным поиск путей решения данной проблемы является для виброзащиты мостовых сооружений, подверженных рискам возникновения усталостных трещин и резонансных явлений, приводящих к разрушению пролетных строений мостов и путепроводов. Методы демпфирования, способные реализовать такую защиту, применяются в настоящее время ограниченно и, как правило, достаточно сложны в эксплуатации и обладают недостаточной надежностью.

Результаты проведенных экспериментальных исследований с использованием макетного образца ДГК, установленного на вибростенде, показали, что применение динамических гасителей колебаний является перспективным направлением виброзащиты мостовых сооружений. Полученные положительные результаты по снижению уровней виброускорений по всем осям измерения вибрации при использовании ДГК и относительная простота конструкций с дополнительными подпружиненными инерционными массами позволяют предложить данный метод виброзащиты пролетных строений как для вновь проектируемых мо-

стов, так и для уже находящихся в эксплуатации объектов. Наиболее оптимальным следует считать размещение ДГК ближе к центру масс (центру тяжести) балки моста, так как в этом случае обеспечивается наибольшая эффективность демпфирования.

Эксперименты проводились в трех возможных режимах виброзащиты: без ДГК; с использованием ДГК с подвешенной только на верхней пружине инерционной массой; с ДГК, инерционная масса которого связана с защищаемым объектом и основанием посредством верхней и нижней пружин. В результате измерений уровней локальной вибрации установлено, что применение динамических гасителей колебаний может в разы снизить уровень вибрационной нагрузки. При этом отмечается, что для классической конструкции ДГК с колеблющейся в противофазе основным колебаниям объекта виброзащиты инерционной массой, подвешенной только на верхней пружине, характерным является снижение вибраций в вертикальном направлении по оси Z, но в процессе затухания колебаний при выключении стенда в результате кратковременного возникновения резонанса и галопирования инерционной массы увеличивается вибрационная нагрузка в горизонтальных направлениях по осям X и Y. Данный недостаток компенсируется в предлагаемом варианте вибрационной защиты, когда инерционная масса гасителя колебаний устанавливается на верхней и нижней пружинах, причем нижний упругий элемент подвески инерционной массы обладает меньшей жесткостью.

Таким образом, проведенные для достижения поставленной цели исследования подтвердили, что предлагаемые технические решения по использованию усовершенствованной конструкции ДГК являются эффективным и перспективным методом обеспечения виброзащиты колеблющихся машин, механизмов и объектов инфраструктуры. Можно с высокой степенью уверенности прогнозировать, что методы виброзащиты на основе использования динамических гасителей колебаний найдут широкое применение в транспортной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышенные нагрузки на мосты по сравнению с проектными значениями при современной интенсивности движения и наличии неровностей дорожных покрытий и рельсовых путей приводят к увеличению вибраций, снижению усталостной прочности металла и появлению дефектов в пролетных строениях, что требует обеспечения вибрационной защиты мостовых сооружений. Приоритетными стратегическими направлениями теоретических и экспериментальных исследований совершенствования методов виброзащиты объектов инфраструктуры следует считать применение пассивных систем виброзащиты в виде упругих виброизоляторов или вязкостных амортизаторов, причем наиболее перспективным с точки зрения надежности, удобства обслуживания и экономической эффективности является использование пружинных динамических гасителей колебаний.

2. Основным техническим противоречием, характерным при использовании демпфирующих виброзащитных устройств, является одновременное обеспечение минимальной жесткости (для защиты от вибраций) и достаточной суммарной жесткости демпфера для ограничения перемещений защищаемого от вибрации объекта. Наиболее перспективным путем устранения данного противоречия может служить применение виброзащитных систем, обладающих квазиузеловой жесткостью.

3. Разработана расчетная схема и конструкция усовершенствованного динамического гасителя колебаний с инерционной массой, закрепленной на двух пружинах, верхняя из которых связана с защищаемым от вибрации объектом, а вторая, нижняя пружина, – с его основанием или фундаментом. Выполнены экспериментальные исследования эффективности применения динамических гасителей колебаний усовершенствованной и

традиционной конструкций, показавшие, что уровни локальных значений виброускорений при использовании ДГК существенно снижаются, при этом использование предлагаемой конструкции с подвеской инерционной массы на двух пружинах обеспечивает наиболее полное гашение колебаний.

4. Основными направлениями дальнейших исследований являются разработка методики выбора характеристик упругости упругих элементов динамических гасителей колебаний и исследования более компактного варианта предлагаемой конструкции демпфирующего устройства с соосным расположением единичного основного упругого элемента и подпружиненной инерционной массы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козлова Н.А., Мишина В.М. О методах виброзащиты фундаментов зданий в условиях города // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2020. № 1. С. 208–210. DOI: 10.24411/9999-034A-10044.
2. Колмогоров Г.Л., Кычкин В.И., Есипенко И.А. Динамическая реакция дорожной одежды на действие движущейся нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. С. 39–47.
3. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach // European Transport Research Review. 2014; 6: 267–275. DOI 10.1007/s12544-013-0127-8.
4. Осинковская В.А. Прогнозирование долговечности асфальтобетонных покрытий на основе уровней их вибронегруженности // Наука и техника. 2015. № 6. С. 49–53.
5. Czech K. R. The impact of the type and technical condition of road surface on the level of traffic-generated vibrations propagated to the environment // Procedia Engineering. Advances in Transportation Geotechnics 3. 2016; 143: 1358–1367. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.160.
6. Сафонов Р.А. Типичные дефекты верхнего дорожного покрытия в России // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2020. Т. 20, № 2. С. 75–84. DOI: 10.14529/build200210.
7. Sun M., Nguyen V. Vibration influence of different types of heavy-duty trucks on road surface damage // Maintenance, reliability and condition monitoring. 16 December 2022; 2669–2961. URL: <https://www.researchgate.net/publication/367325762>. DOI: 10.21595/marc.2022.23020.
8. Žuraulis V., Levulytė L., Sokolovskij E. The impact of road roughness on the duration of contact between a vehicle wheel and road surface // Transport. 2014; 29(4): 431–439. DOI: 10.3846/16484142.2014.984330.
9. Локтев А.А., Илларионова Л.А. Моделирование влияния неровностей железнодорожного

пути на распространение вибраций // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 2 (111). С. 39–41.

10. Илларионова Л.А., Локтев А.А., Боков С.С. Динамическое воздействие на вязко-упругую плиту основания городского транспорта // Наука и техника транспорта. 2023. № 1. С. 52–56.

11. Локтев А.А., Баракат А. Анализ поведения пролетных строений с трещинами при вибрациях // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS322.pdf>. DOI: 10.15862/04SAT322.

12. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4, № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. DOI: 10.15862/14TS417.

13. Локтев А.А., Королев В.В., Шишкина И.В. Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80, № 6. С. 334–342. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>.

14. Castaldo P. Passive energy dissipation devices // Integrated seismic design of structures and Control systems. November 2014: 21–62. DOI: 10.1007/978-3-319-02615-22.

15. Dallard P. et al. Millennium Bridge, London: Problems and solutions // Structural Engineer. Project: London Millennium Pedestrian Bridge. January 2001; 79(8): 15–17.

16. Liu, K., Liu, J. The damped dynamic vibration absorbers: revisited and new result // Journal of Sound and Vibration. 2005; 284 (3-5): 1181–1189. DOI:10.1016/j.jsv.2004.08.002.

17. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Филиппова В.О. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 2. Аналогии, мероприятия // Наукоедение. 2015. Т. 7, № 6. С. 1–21. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf>. DOI: 10.15862/08KO615.

18. Корытов М.С., Кашапова И.Е., Щербakov В.С. Методика оптимизации основных параметров виброзащитной системы сиденья автогрейдера с квазиулеговой статической характеристикой // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2. С. 180–193. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-180-193>.

19. Zhang W., Qian Ch., Pan L., Wang Y., Xu N. Design and research of a closed active quasi-zero stiffness vibration isolation device // Journal of precision instrument and machinery. 2022; 2, vol. 1: 18–24. DOI: 10.23977/jpim.2022.020103.

20. Klitnoi V, Gaydamaka A. On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness // Diagnostyka. 2020; 21(2): 69–75. DOI: 10.29354/diag/122533.

21. Зотов А.Н., Креминский Д.А. Равночастотная виброизолирующая система на основе упругого элемента, перемещающегося между направляющими расчетной формы перпендикулярно их оси симметрии // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 3. С. 87–91. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-10316.

22. Глушков С.П., Кочергин В.И. Применение устройств с квазиулеговой жесткостью для виброзащиты машин и механизмов // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3. Ч. 1. С. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.65.3.030>.

23. Глушков С.П., Кочергин В.И. Новые подходы к обеспечению виброзащиты машин // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 1 (4). С. 41–47. DOI: 10.52170/2712-9195/2022_1_41.

24. Глушков С.П., Кочергин В.И., Проворная Д.А. Снижение колебаний мостовых сооружений // Вестник СГУПС. 2022. № 4 (63). С. 77–85. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_63_77.

REFERENCES

1. Kozlova N.A., Mishina V.M. About methods of vibration protection of the buildings' foundations in a city. *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie*. 2020; 1: 208–210. (in Russ.) DOI: 10.24411/9999-034A-10044.

2. Kolmogorov G.L., Kychkin V.I., Esipenko I.A. Dynamic response of pavement to the action of moving load. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015; 5: 39–47. (in Russ.)

3. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach. *European Transport Research Review*. 2014; 6: 267–275. DOI 10.1007/s12544-013-0127-8.

4. Osinovskaya V.A. Forecasting of durability of asphalt pavement on the basis of levels of their vibration loading. *Science & Technique*. 2015; (6): 49–53. (In Russ.)

5. Czech K.R. The impact of the type and technical condition of road surface on the level of traffic-generated vibrations propagated to the environment. *Procedia Engineering. Advances in Transportation Geotechnics* 3. 2016; 143: 1358–1367. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.160.

6. Safonov R.A. Typical paving defects in Russia. *Bulletin of the South Ural state university. Series Construction Engineering and architecture*. 2020; 20, vol. 2: 75–84. DOI: 10.14529/build200210. (in Russ.)

7. Sun M., Nguyen V. Vibration influence of different types of heavy-duty trucks on road surface damage. *Maintenance, reliability and condition monitoring*. 16 December 2022; 2669–2961. URL: <https://www.researchgate.net/publication/367325762>. DOI: 10.21595/marc.2022.23020.

8. Žuraulis V., Levulytė L., Sokolovskij E. The impact of road roughness on the duration of contact between a vehicle wheel and road surface. *Transport*. 2014; 29(4): 431–439. DOI:10.3846/16484142.2014.984330.

9. Loktev A.A., Illarionova L.A. Modeling the Influence of Local Irregularities of the Railway Track on Vibration Propagation. *Transport of the Russian Federation*. 2024; (2): 39–41. (In Russ.)

10. Illarionova L.A., Loktev A.A., Bokov S.S. Dynamic Impact of Crew on Viscoelastic Base Plate of Urban Transport. *Science and Technology in Transport*. 2023; (1): 52–56. (In Russ.) EDN: CHMOKL

11. Loktev A.A., Barakat A. Behavior analysis of span structures with cracks during vibrations. *Russian journal of transport engineering*. 2022; 9, vol. 3. (in Russ.) URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS322.pdf>. DOI: 10.15862/04SAT322.
12. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Majstrenko I.YU., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*. 2017; 4, vol. 4. URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. DOI: 10.15862/14TS417.
13. Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V. Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges. *RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL*. 2021; 80(6): 334–342. (In Russ.) <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>
14. Castaldo P. Passive energy dissipation devices. *Integrated seismic design of structures and Control systems*. November 2014: 21–62. DOI: 10.1007/978-3-319-02615-22.
15. Dallard P. et al. *Millennium Bridge, London: Problems and solutions*. Structural Engineer. Project: London Millennium Pedestrian Bridge. January 2001; 79(8): 15–17.
16. Liu, K., Liu, J. The damped dynamic vibration absorbers: revisited and new result. *Journal of Sound and Vibration*. 2005; 284 (3-5): 1181–1189. DOI:10.1016/j.jsv.2004.08.002.
17. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Filippova V.O. Dancing bridge in Volgograd: reasons, analogies, measures. Part 1. Reasons. *Naukovedenie*. 2015; 7, vol. 6: 1–21. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf>. DOI: 10.15862/08KO615.
18. Korytov M.S., Kashapova I.E., Shcherbakov V.S. Optimization method for main parameters of vibration protection system in motor grader seat with quasi-zero static characteristic. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 180–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-180-193>. EDN: WKLVO
19. Zhang W., Qian Ch., Pan L., Wang Y., Xu N. Design and research of a closed active quasi-zero stiffness vibration isolation device. *Journal of precision instrument and machinery*. 2022; 2, vol. 1: 18 – 24. DOI: 10.23977/jpim.2022.020103.
20. Klitnoi V, Gaydamaka A. On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. *Diagnostyka*. 2020; 21(2): 69–75. DOI: 10.29354/diag/122533.
21. Zotov A.N., Kreminsky D.A. Equal frequency vibration isolating system based on an elastic element moving between the guides of the calculated shape perpendicular to their axis of symmetry. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2020; no. 3: 87–91. DOI:10.24411/0131-4270-2020-10316
22. Sergey P. Glushkov, Victor I. Kochergin. Use of devices with quasi-zero stiffness for vibration protection of machines and mechanisms, Marine intellectual technologies. 2024; 3 part 1: P. 113–119. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.030
23. Glushkov S.P., Kochergin V.I. New approaches to vibration protection of machines. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2022; 1 (4): 41–47. DOI: 10.52170/2712-9195/2022_1_41. (in Russ.)
24. Glushkov S.P., Kochergin V.I., Provornaya D.A. Reduction of vertical acceleration bridge structure. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022; (63): 77–85. (In Russ.). DOI: 10.52170/1815-9265_2022_63_77.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кочергин В.И. Организация и проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Глушков С.П. Формулирование теоретических предпосылок, цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования.

Абраменков Д.Э. Организация и проведение экспериментов.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Glushkov S.P. Formulation of theoretical prerequisites, goals and objectives of the study, development of the research methodology

Kochergin V.I. Organization and conduct of experiments, processing of experimental data, preparation of material for the article

Abramenkov D.E. Organization and conduct of experiments

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочергин Виктор Иванович – д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-1458>,

SPIN-код: 2949-7253,

e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Глушков Сергей Павлович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5745-4658>,

SPIN-код: 3313-6164,

e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Абраменков Дмитрий Эдуардович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7939-6014>,

SPIN-код: 3329-5595,

e-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor I. Kochergin – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Technology of Transport Engineering and Operation of Machines” Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-1458>,

SPIN-code: 2949-7253,

e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Sergey P. Glushkov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department “Technology of Transport Engineering and Operation of Machines” Siberian

Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5745-4658>,

SPIN-code: 3313-6164,

e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Dmitrij E. Abramenzkov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department “Buildings, Structures and Materials” Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7939-6014>,

SPIN-code: 3329-5595,

e-mail: abramenzkovde@sgups.stu.ru