

УДК 624.042.7:613.644

В. И. ЕРОФЕЕВ¹, д-р физ.-мат. наук, проф., директор; **И. В. ШКОДА**, аспирант¹, асс. кафедры теории сооружений и технической механики²; **Е. Н. ОБЛЕТОВ**, аспирант¹, асс. кафедры теории сооружений и технической механики²; **Т. В. ЮРЧЕНКО²**, канд. пед. наук, доц. кафедры прикладной информатики и статистики; **К. В. ГОЛУБЕВА²**, канд. техн. наук, доц. кафедры стандартизации, метрологии и управления в технических системах

МОНИТОРИНГ ВИБРОСОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОЛНОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Россия, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85. Тел.: (831) 432-05-76; эл. почта: erof.vi@yandex.ru

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: ShkodIrinaVasil@yandex.ru, yu_ta@list.ru, golubeva-kira@bk.ru

Ключевые слова: вибрационное воздействие, колебания, воздействия от транспортных магистралей, рельсовый транспорт, фазометрический комплекс, микроволновая интерферометрия.

Описан пример практического применения фазометрического комплекса ФМК-301 М под управлением ноутбука. Производятся измерения перемещений ограждающей конструкции здания ОКН от вибрационного воздействия рельсового транспорта. Результаты измерений используются для дальнейшего расчета виброскоростей и виброускорений, необходимых для оценки влияния вибрации на появление повреждений несущих конструкций здания.

Территория любого населенного пункта является очагом техногенных нагрузок, к которым относятся электрическое, магнитное, шумовое и вибрационное поля. Вибрационное поле складывается из различных динамических нагрузок, источниками которых являются: строительная техника, машины и механизмы, железнодорожный и другой рельсовый транспорт, автотранспорт.

Заметное влияние транспорт оказывает на существующую застройку, особенно в старых, сложившихся частях городов. Улично-дорожная сеть в исторической части города обычно сохраняется еще с момента начала планирования и строительства населенного пункта. Однако за годы существования такой улицы изменяется и состав транспортного потока, и масса транспортных средств, и интенсивность потока. Старинные улицы превращаются в оживленные транспортные магистрали, при этом состав элементов улицы и их ширина в «красных линиях» часто остаются без изменений из-за отсутствия возможности расширения. Здания на таких улицах расположены близко к проезжим частям, часто отделены от них лишь тротуаром. Вдобавок новые здания также строятся вдоль существующих «красных линий», без учета требований нормативных документов [1].

Вибрационное воздействие от транспорта оказывает негативное влияние на состояние строительных конструкций и фундаментов существующих зданий и, как правило, ухудшает свойства грунтов. Поэтому проведение оценки и анализа такого рода воздействия на здания и их фундаменты в условиях сложившейся застройки является актуальной задачей в настоящее время [2].

Полученные на основании выполненных исследований данные позволят в дальнейшем определить необходимость дополнительных мероприятий по защите зданий от вибрационного поля в условиях плотной городской застройки [3].

В качестве объекта исследования, подвергающегося антропогенному воздействию, выбрано здание, располагающееся по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65, корп. 1.

Согласно выписке из единого государственного реестра объектов культурного наследия народов Российской Федерации, исследуемое здание относится к объектам культурного наследия регионального значения (рис. 1 цв. вклейки).

Территория, на которой располагается здание, подвержена высокой вибрационной нагрузке, связанной с расположенной на ней трамвайной линией. Частота проезда трамваев достигает 300 ед./сутки. Модель источника антропогенного воздействия и ситуационная схема представлены на рис. 2 и 3 цв. вклейки.

Как указано в ГОСТ Р 53964-2010 [4], при исследовании вибрационного воздействия, помимо времени измерений, важно зарегистрировать другую информацию о факторах, определяющих вариабельность измеряемой величины вибрации и поэтому важных для правильной интерпретации полученных результатов.

Исследуемое здание – 4-этажное с цокольным этажом, размеры в плане 45×18 м, стены кирпичные с шириной не менее 2 метров, фундамент ленточный, перекрытия деревянные. Здание расположено параллельно проезжей части на участке с уклоном 1,5 %.

Улица Ильинская является одной из центральных улиц города со средневысокой интенсивностью потока. Дорожное покрытие – асфальт. Двухпутная трамвайная дорога. Расстояние от источника вибрационного воздействия (центральной оси трамвайного пути) до здания: от ближних путей – 8,5 м, от дальних – 12,3 м. Рельсовый транспорт представлен 14-метровыми четырехосными вагонами (масса вагона без пассажиров 17–25 т). Основные модели трамваев: 71-415Р (ретро), 71-407. Преобладание легкового транспорта. Расстояния до ближайших светофоров около 300 м в обе стороны, что мало влияет на интенсивность потока. Наличие пробок – редкие и непродолжительные в вечерний час-пик.

Исследуемое здание построено в 1840-х г., надстроено в 1934 г. Здание связано с тремя корпусами. Назначение здания – учебное. Количество человек, постоянно находящихся в корпусе – 250.

В данной исследовательской работе в качестве средства измерения параметров уровня вибрации выбран комплекс фазометрический ФМК-301 М (рис. 4 цв. вклейки). Микроволновый интерферометр позволяет измерять параметры колебаний с минимальным искажением. Данное устройство относится к области средств измерения перемещения с использованием радиоволн фазовым методом [5].

Структурная схема исследования представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема определения виброперемещений ограждающих конструкций

Лабораторный стенд для кинематической развязки основания с платформой – носителем сенсоров внешних динамических воздействий – работает следующим образом (рис. 5 цв. вклейки). Измерительное оборудование (микроволновый интерферометр) измеряет расстояние до исследуемой точки конструкции. При вибрационных воздействиях на исследуемые конструкции колебания передаются на металлическую раму, имеющую кинематическую развязку по направлению проводимых измерений с платформой. Интерферометр, размещаемый на платформе, фиксирует смещения исследуемой точки конструкции (кирпичной стены).

Выходной сигнал микроконтроллера, являющийся дискретным представлением зависимости смещения (Δx) от времени, передается по локальной сети на центральный процессор системы мониторинга перемещений контролируемого объекта (центральный компьютер и программа, созданная на платформе *LabVIEW*) для последующей обработки (рис. 6 цв. вклейки).

Программное обеспечение предназначается для сбора, отображения, сохранения и обработки измерительной информации от микроволновых датчиков смещения (МДС), а также исполнения алгоритма обратной связи по измеряемому выходу на основе информации от МДС. Программа устанавливает соединение с МДС по стандарту *Controller Area Network (CAN)*, принимает и отображает измерительную информацию, а также текущее состояние МДС совместно с величиной управляющего воздействия. Программа позволяет запустить и остановить измерение, записать измерительные данные в файл на жестком диске персонального компьютера. Основная функция программы заключается в обработке измерительной информации МДС и представлении ее в виде графика зависимости взаимных смещений конструкций и величины управления от времени.

Процесс измерения вибрационного воздействия от транспорта описан ниже и представлен на блок-схеме (рис. 2).

Отслеживание местоположения трамваев № 2 и № 21 производилось на онлайн-картах [6, 7]. При приближении трамвая к зданию активировалась запись перемещений, а при удалении трамвая и уменьшении уровня колебаний запись останавливалась. Результаты сохранялись в файл с расширением *.txt* для дальнейшей обработки.

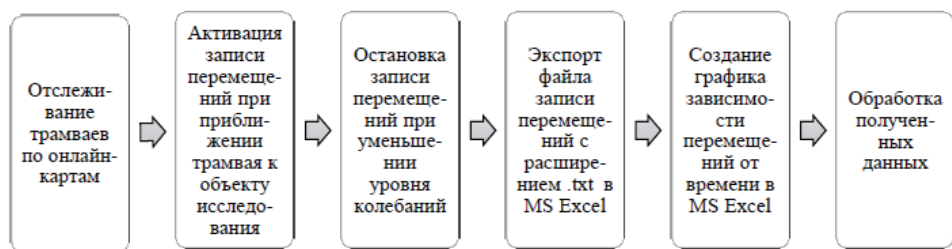


Рис. 2. Блок-схема процесса измерения вибрационного воздействия от транспорта

В качестве основных фиксируемых параметров при сборе данных были приняты: номер маршрута, расстояние от источника вибрационных воздействий (ближние/дальние пути), время измерений. Некоторые результаты измерений приведены в таблице.

**К СТАТЬЕ В. И. ЕРОФЕЕВА, И. В. ШКОДА, Е. Н. ОБЛЕТОВА,
Т. В. ЮРЧЕНКО, К. В. ГОЛУБЕВОЙ «МОНИТОРИНГ
ВИБРОСОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ
С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОЛНОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА»**



Рис. 1. Объект культурного наследия, расположенный по адресу: г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65, корп. 1



Рис. 2. Модель источника антропогенного воздействия

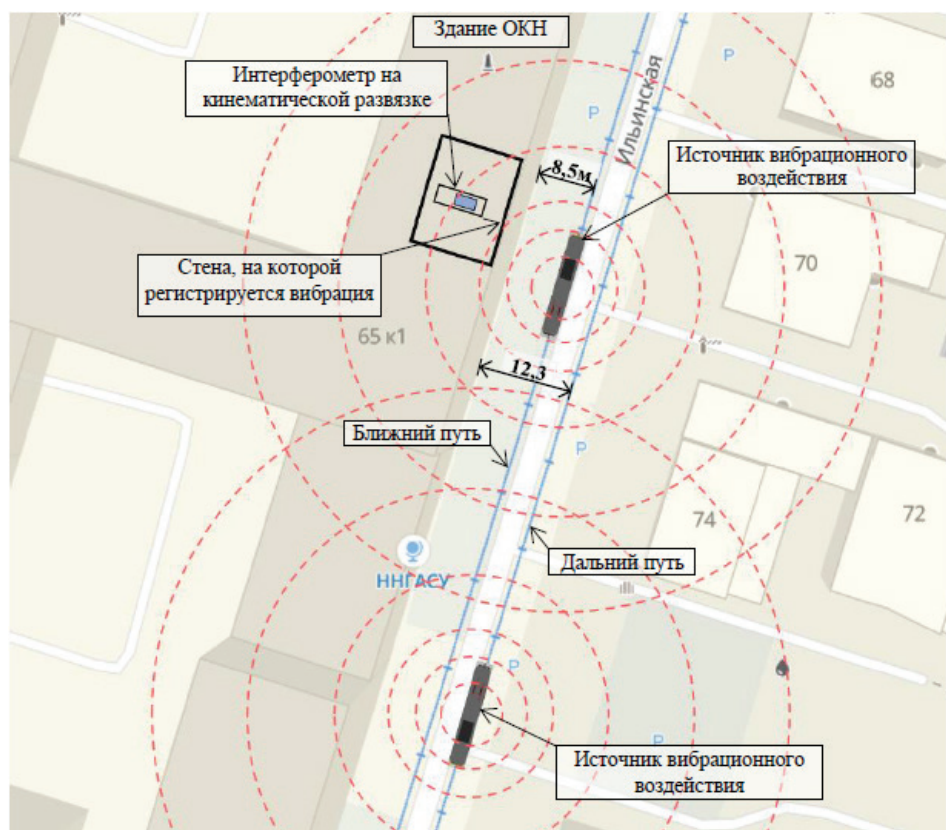


Рис. 3. План-схема исследования по оценке вибрационных воздействий на несущую стену здания

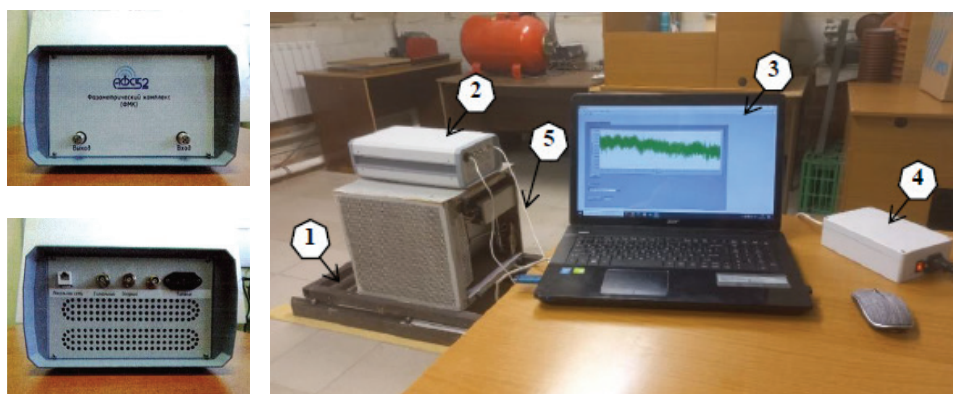


Рис. 4: *а* – передняя и задняя панели блока ШТУ ФМК соответственно; *б* – общий вид ФМК в сборе: 1 – лабораторный стенд для кинематической развязки основания с платформой; 2 – микроволновый интерферометр; 3 – центральная ЭВМ (сервер) сети контрольного измерительного оборудования – ФМК; 4 – блок питания; 5 – фидерный тракт (комплект ВЧ кабелей)

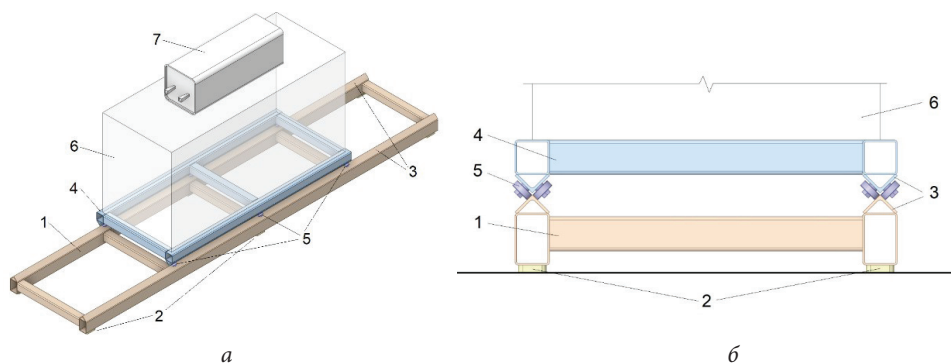


Рис. 5. Лабораторный стенд: *а* – схема лабораторного стенда; *б* – поперечный разрез лабораторного стенда; 1 – неподвижное основание – металлическая рама; 2 – демпфирующие прокладки; 3 – направляющие треугольного профиля; 4 – сварная металлическая тележка; 5 – шесть парных стальных колес в виде подшипников качения; 6 – платформа-носитель; 7 – измерительное оборудование

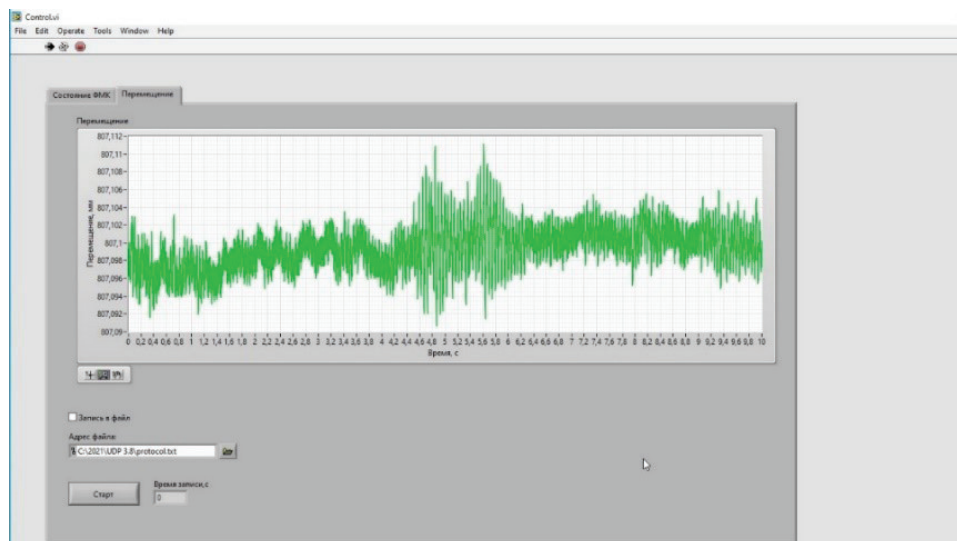


Рис. 6. Диалоговое окно программы, созданной на платформе LabVIEW, с регистрацией амплитуд при движении трамвая

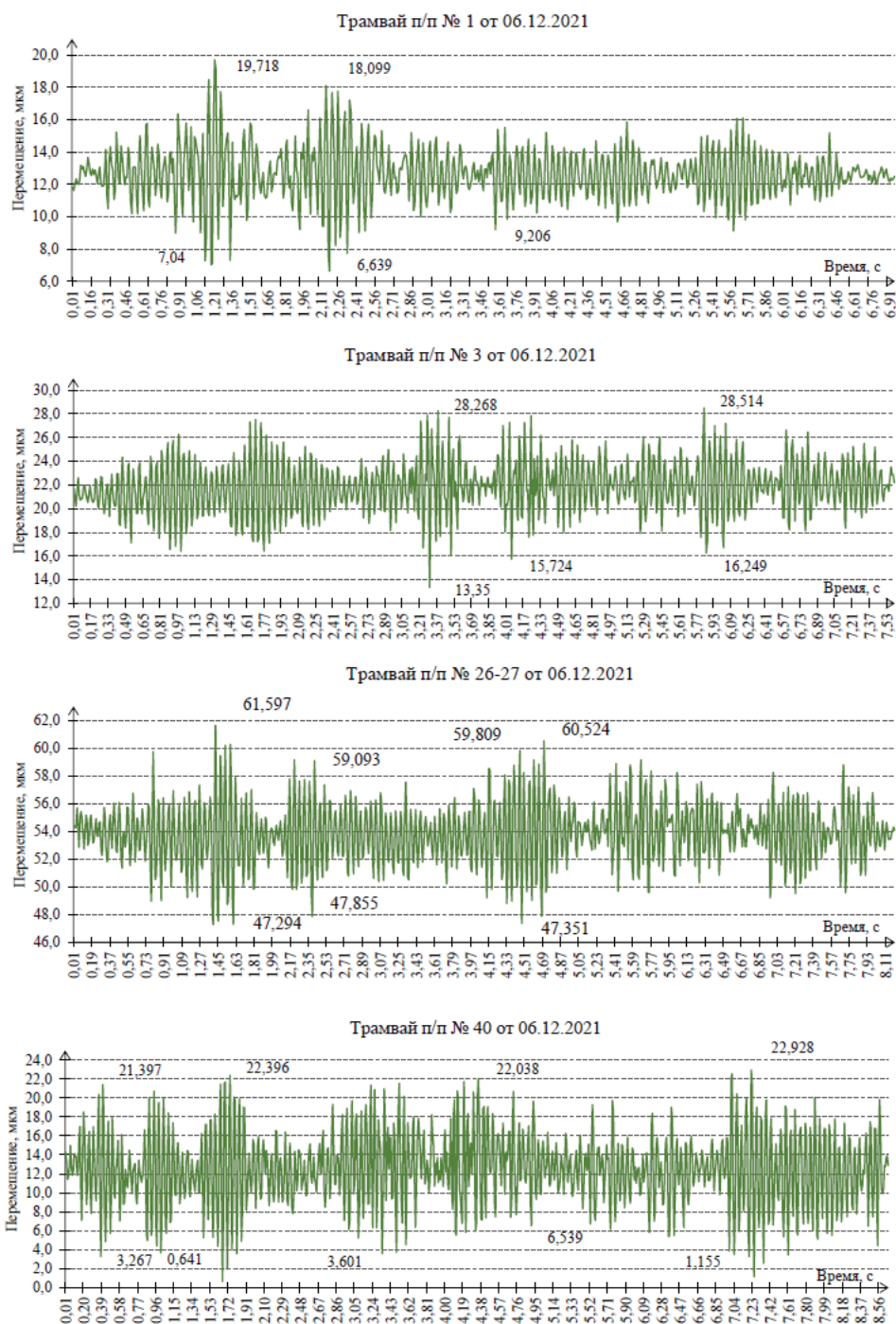


Рис. 7. Графики зависимости перемещений от времени

**Некоторые результаты измерений, проведенные 06.12.2021**

Номер измерения	Время измерений	Номер маршрута	Пути	Примечание
1	8:16	2	ближние	
3	8:18	21	дальние	
26	17:52	21	ближние	совместное воздействие
27	17:53	2	дальние	
40	18:41	2	дальние	
Примечание. Ближние/дальние пути – рельсовые пути, расположенные на расстоянии 8,5/12,3 м от здания ОКН соответственно				

В целях проводимого исследования были выделены временные периоды наиболее вероятного и наиболее существенного вибрационного воздействия на экспериментальный объект.

В ходе предварительных наблюдений было зафиксировано наибольшее количество проходящих трамваев ежедневно во временные периоды с 8:00 до 9:00, с 11:00 до 12:00, с 14:30 до 15:30 и с 17:30 до 18:30, называемые соответственно утренний, полуденный, дневной и вечерний периоды. При этом отмечалось, что утренние и вечерние часы характеризовались наибольшей интенсивностью движения с одновременными проездами трамваев по встречным направлениям.

Время фиксирования сигнала измерительного устройства при проведении замеров продолжительностью от 14 до 20 с было принято в проводимом эксперименте оптимальным исходя из частоты фиксирования перемещений и точности прибора. Прибор фиксировал показания с частотой дискретизации 100 Гц (100 отсчетов в секунду). Таким образом, в указанном временном промежутке удавалось получить наиболее характерную повторяющуюся кривую изменения измеряемых перемещений путем фиксирования порядка 1500–2000 показаний прибора. После проведения каждого замера его результаты выгружались в формате .txt, совместимом с электронными таблицами *MS Excel*, что делало удобным построение предварительного графика распределения измеряемой величины и сравнения получаемых результатов. Таким образом осуществлялось предварительное отсеивание промахов и неудачных замеров (действия, необходимые для исключения ошибок в получаемых данных).

Фиксируемые прибором значения перемещений можно представить в виде графика зависимости перемещений от времени (рис. 7 цв. вклейки).

По графикам зависимости можно получить частотный спектр колебаний (рис. 3). Согласно [8] значения полученных частот входят в типичный диапазон параметров вибрации зданий от рельсового транспорта (1–80 Гц). Как видно по гистограммам, для каждого измерения от 40 до 55 процентов колебаний имеют частоту 20 Гц.

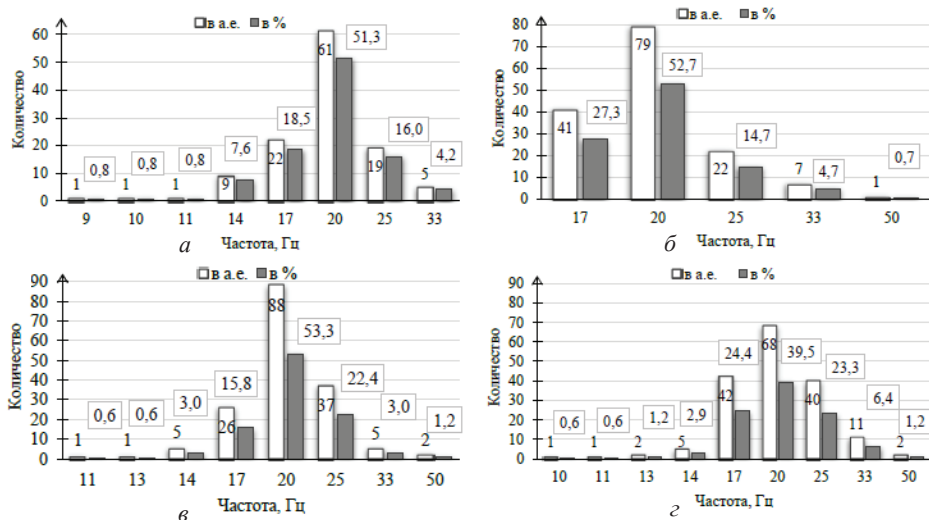


Рис. 3. Частотный спектр: а – трамвай п/п № 1; б – трамвай п/п № 3; в – трамвай п/п № 26–27; г – трамвай п/п № 40

Вибрационное воздействие от проезда рельсового транспорта в стенах объекта исследования ощущается и без специальных измерений. Шум и вибрация, создаваемая проездом рельсового транспорта, становятся ощутимыми за несколько секунд до проезда трамвая мимо здания ОКН и продолжают несколько секунд после. При этом амплитуды колебаний несущей стены от проезда трамваев, измеренные прибором, достигали 15 микрон.

Опыт практического применения фазометрического комплекса ФМК-301 М подтверждает техническую возможность успешного применения данного современного оборудования для решения прикладных измерительных задач, а именно измерение перемещений ограждающей конструкции от вибрационного воздействия антропогенного характера.

Также в процессе исследования выполнены следующие работы:

- разработана новая полезная модель лабораторного стенда для кинематической развязки основания и фазометрического комплекса;
- проведены научные исследования с определением продолжительности и интервала наблюдений для обеспечения статистической выборки с требуемыми параметрами математических ожиданий, наблюдаемых амплитуд и показателей вариации;
- проведено и обработано более 100 натурных измерений параметров колебаний элементов строительных конструкций зданий с использованием микроволновых интерферометров, что дает возможность сделать обоснованные выводы о статистической значимости измерений и правомерности выводов, которые будут описаны в следующих работах.

На следующих этапах исследования планируется установка оборудования для измерения вибраций на первом, втором и третьем этажах здания ОКН, что даст полную картину того, как строительные конструкции и здание в целом реагирует на вибрационное воздействие антропогенного характера. Полученные в ходе такого исследования данные о значениях виброскоростей и виброускорений позволят



определить жесткости несущих конструкций здания ОКН, которые невозможно установить из-за потери проектной документации в связи с ранними этапами возведения подобных объектов.

Данная работа выполнена при поддержке Научно-образовательного центра Нижегородской области «Техноплатформа 2035» в рамках соглашения № 16-11-2021/55.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шутова, О. А. Анализ вибрационного воздействия автотранспорта на конструкции фундаментов жилых зданий : специальность 05.23.02 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шутова Ольга Александровна ; [Место защиты : Волгоградский государственный технический университет]. – Волгоград, 2018. – 17 с. – Текст : непосредственный.
2. Золина, Т. В. Исследование влияния вибрационных воздействий от автотранспорта на состояние конструкций фундамента жилого здания / Т. В. Золина, Н. В. Купчикова. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 3 (29). – С. 24–29.
3. Савин, С. Н. Современные методики определения динамических параметров зданий и сооружений в соответствии с ГОСТ Р 53778-2010 и ГОСТ Р 54859-2011 / С. Н. Савин, И. Л. Данилов. – Текст : непосредственный // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты) / Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС РФ. – Санкт-Петербург, 2013. – № 3 (7). – С. 37–46.
4. ГОСТ Р 53964-2010. Вибрация. Вибрация зданий. Измерение вибрации сооружений. Руководство по проведению измерений. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с. – Текст : непосредственный.
5. Патент 2705930 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/36. Микроволновый интерферометр : № 2019111477 : заявл. 17.04.2019 : опубл. 12.11.2019 / В. А. Канаков ; заявитель и патентообладатель ООО «АФС 52». – Текст : непосредственный.
6. Трамваи и троллейбусы Нижнего Новгорода онлайн. – URL: <http://ttu-nn.ru/map/> (дата обращения: 10.12.2021). – Текст : электронный.
7. Яндекс. Карты. Общественный транспорт Нижнего Новгорода – URL: <https://yandex.ru/maps/47/nizhny-novgorod/> (дата обращения: 10.12.2021). – Текст : электронный.
8. ГОСТ Р 52892-2007 Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 20 с. – Текст : непосредственный.

EROFEEV¹ Vladimir Ivanovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, director; SHKODA Irina Vasilevna, postgraduate student¹, assistant of the chair of theory of structures and technical mechanics²; OBLYOTOV² Evgeny Nikolaevich, postgraduate student¹, assistant of the chair of theory of structures and technical mechanics²; YURCHENKO² Tatyana Vladislavovna, candidate of pedagogic sciences, associate professor of the chair of applied informatics and statistics; GOLUBEVA² Kira Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of standardization, metrology and management in technical systems



MONITORING OF THE VIBRATION STATE OF A DENSE URBAN DEVELOPMENT USING A MICROWAVE INTERFEROMETER

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”

85, Belinsky St., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, Tel.: +7 (831) 432-05-76;

e-mail: erof.vi@yandex.ru

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: (831) 430-54-96;

e-mail: ShkodaIrinaVasil@yandex.ru, yu_ta@list.ru, golubeva-kira@bk.ru

Key words: vibration effects, vibrations, impacts from highways, rail transport, phasometric complex, microwave interferometry.

The article describes an example of the practical application of the FMK-301 M phasometric complex under laptop control. Movements of the enclosing structure of a historic building from the vibration effects of rail transport were measured. The measurement results are used for further calculation of vibration velocities and vibration accelerations necessary to assess the impact of vibration on the appearance of damage to the load-bearing structures of the building.

REFERENCES

1. Shutova O. A. Analiz vibratsionnogo vozdeystviya avtotransporta na konstruktivnyye fundamenty zhilykh zdaniy [Analysis of the vibration impact of vehicles on the construction of foundations of residential buildings]: spetsialnost 05.23.02 : avtoref. dis. ... k-ta tekhn. nauk; [Mesto zaschity: Volgogr. gos. tekhn. un-t]. – Volgograd, 2018, 17 p.
2. Zolina T. V., Kupchikova N. V. Issledovanie vliyaniya vibratsionnykh vozdeystviy ot avtotransporta na sostoyanie konstruktivnykh fundamentov zhilogo zdaniya [Investigation of the influence of vibration effects from motor vehicles on the condition of the foundation structures of a residential building] / Inzhenerno-stroitelny vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. – 2019. – № 3(29). – P. 24–29.
3. Savin S. N., Danilov I. L. Sovremennyye metodiki opredeleniya dinamicheskikh parametrov zdaniy i sooruzheniy v sootvetstviy s GOST R 53778-2010 i GOST R 54859-2011 [Modern methods for determining the dynamic parameters of buildings and structures in accordance with GOST R 53778-2010 and GOST R 54859-2011] / Prirodnye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskiye i prikladnyye aspekty) [Natural and man-made risks (physical, mathematical and applied aspects)] / Sankt-Peterburgskiy universitet gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS RF. – Saint-Petersburg, 2013. – № 3 (7). – P. 37–46.
4. GOST R 53964-2010 Vibratsiya. Vibratsiya zdaniy. Izmerenie vibratsii sooruzheniy. Rukovodstvo po provedeniyu izmereniy [Vibration. Measurement of vibration in buildings. Guidance on measurement methods]. – Moscow : Standartinform, 2019, 16 p.
5. Pat. 2705930 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01 S 13/36. Mikrovolnovy interferometer [Microwave interferometer] : № 2019111477; zayavl. 17.04.2019; opubl. 12.11.2019 ; zayavitel i patentoobladatel OOO “AFS 52”.
6. Tramvai i trolleybusy Nizhnego Novgoroda onlayn [Trams and trolleybuses of Nizhny Novgorod online]. URL: <http://ttu-nn.ru/map/> (data obrascheniya: 10.12.2021).
7. Yandeks. Karty. Obschestvenny transport Nizhnego Novgoroda [Yandex. Maps. Public transport of Nizhny Novgorod]. URL: <https://yandex.ru/maps/47/nizhny-novgorod/> (data obrashcheniya: 10.12.2021).
8. GOST R 52892-2007 Vibratsiya i udar. Vibratsiya zdaniy. Izmerenie vibratsii i otsenka eyo vozdeystviya na konstruktivnyy [Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and evaluation of its effects on structure]. – Moscow : Standartinform, 2008, 20 p.

© В. И. Ерофеев, И. В. Шкода, Е. Н. Облетов, Т. В. Юрченко, К. В. Голубева, 2022

Получено: 26.02.2022 г.