

## К ВОПРОСУ О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ \*

Г.Н. Гусев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.В. Епин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.В. Цветков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.П. Шестаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

### Для цитирования:

Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В., Шестаков А.П. К вопросу о развитии методов измерения вибрации строительных конструкций // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 4. – С. 32–40. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.4.3>

Вибрационные процессы содержат полезную информацию о свойствах как источника сигнала, так и среды, в которой они распространяются. Контроль вибрационных параметров конструкций является неотъемлемой составляющей мониторинга. Существуют различные методы и средства измерений вибрационных процессов в строительных конструкциях, а также их регистрации. Развитие техники и электроники позволяет неуклонно улучшать параметры вибрационных приборов, уменьшать их габариты и создавать принципиально новые сенсоры. Приведены примеры виброизмерительного оборудования, используемого сотрудниками Института механики сплошных сред для испытания крупномасштабных строительных конструкций за последние 25 лет. Показаны результаты измерений вибраций крупномасштабных конструкций, а также эволюция собственной частоты конструкции здания при ее многолетнем мониторинге.

**Ключевые слова:** *вибрация, крупномасштабная конструкция, строительная конструкция, сейсмометр, акселерометр.*

Исследованиям динамики механических процессов различных объектов посвящено огромное число научных работ. Это направление исследований актуально по ряду причин. Во-первых, в реальных условиях состояние полного покоя практически недостижимо, такова суть наблюдаемых природных явлений. Объекты взаимодействуют друг с другом и участвуют в механическом движении, в том числе

и окружающая нас среда: горные породы, грунты, расположенные на них здания, конструкции и механизмы, их отдельные элементы и даже представители флоры и фауны. Во-вторых, наблюдаемые механические волновые процессы взаимодействия тел между собой или тел с окружающей средой содержат полезную информацию как об источнике сигнала, так и о среде, которой они распространяются. Это

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ПФИЦ УрО РАН (номер темы АААА-А19-19012290100-8).

важно с точки зрения механики и позволяет найти применение в самых разных ее разделах и на разных масштабах: от задач изучения недр, до определения свойств миниатюрных образцов.

Анализ вибрационных процессов представляет интерес и для широкого спектра ответственных инженерных конструкций, таких как мосты, сооружения, здания в задачах контроля и мониторинга их деформационного состояния. Основной целью мониторинга является безопасная эксплуатация объекта исследования и прогнозирование его деформационной безопасности. Это необходимо для предотвращения развития негативных сценариев эксплуатации таких объектов, которые могут привести к существенным экономическим потерям, а в случае катастрофических разрушений – к человеческим жертвам. Главной особенностью рассматриваемых крупномасштабных строительных конструкций являются их геометрические размеры и массивность, что определяет аспекты проведения мероприятий по мониторингу, а именно влияет на выбор измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Вибрационные процессы характеризуются различными параметрами. Наиболее используемыми из них являются амплитуда, частотный спектр, сдвиг фаз между сигналами, декременты затухания. Собственные колебания конструкции помимо частоты также характеризуются соответствующей ей формой, показывающей, каким образом будет деформироваться исследуемая структура на данной частоте. В ряде случаев на крупномасштабных конструкциях собственные формы можно наблюдать воочию, как, например, на «танцующем мосту» в г. Волгограде 20 мая 2010 г.

Для крупных сооружений характерны низшие собственные частоты порядка 1 Гц, которые, как известно, зависят от жесткости и массы объекта. С уменьшением габаритов конструкции собственные частоты, как правило, увеличиваются. Любая крупномасштабная конструкция состоит из отдельных (существенно меньших) конструктивных элементов, динамическое поведение кото-

рых уже нужно анализировать в более высоком частотном диапазоне для решения задач их деформационного поведения.

Постоянство описанных выше динамических параметров с течением времени говорит о неизменности деформационного состояния конструкции, а уход сигнализирует об его изменении. Поэтому так важна долговременная стабильность измерительных устройств для мониторинга объектов, чтобы с течением времени фиксировать реальные изменения свойств самой конструкции, а не датчика или его крепления. И в этом аспекте измерение динамических параметров имеет преимущество перед квазистатическими. Оно заключается в том, что период колебаний (или частота) контролируется более надежно при длительных испытаниях, занимающих годы, чем амплитуда, поскольку возможна деградация как чувствительного элемента, так и его соединения с конструкцией, а замена, например, датчика деформации невозможна без изменения его показаний.

Кроме того, нельзя не отметить и существенное влияние температуры окружающей среды как на напряженно-деформированное состояние конструкции, так и на измерительную аппаратуру. Суточные колебания температуры, не говоря уже о сезонных изменениях, могут быть значительными, как и их вклад в деформационный портрет конструкции. Амплитуды у разных динамических сигналов также подвержены этим негативным влияниям, но частотно-временные параметры обладают большей стабильностью. Поскольку измерение времени определяется кварцевыми резонаторами устройств, точность даже недорогих имеет порядок  $10^{-5}$  (секунда в сутки), а чуть более продвинутые термокомпенсированные генераторы обладают стабильностью в одну миллионную долю. Поэтому, обладая такими параметрами, можно контролировать, например, значение собственной частоты конструкции различными регистрирующими приборами, не беспокоясь получить принципиально разные значения из-за используемой аппаратуры.

Исследование вибрационных процессов, особенно происходящих в земной коре, интересовало людей еще в древние времена. Тогда и появились первые сейсмографы – приборы для обнаружения землетрясений, которые могли зафиксировать сам факт даже слабого толчка. К 19-му веку приборы стали записывать сейсмограммы на бумаге при помощи карандаша, прикрепленного к маятнику, а бумага вращалась при этом в рулоне. Уже тогда началось условное разделение измерительного прибора на чувствительную (датчик) и регистрирующую часть, каждая из которых совершенствовалась. С развитием теории электричества и магнетизма стали появляться различные варианты датчиков, преобразующих механические колебания в электрический сигнал. С помощью электроизмерительных приборов у периодических сигналов можно было оценивать такие параметры, как амплитуда или частотный спектр. Однако запись сигналов (и обработка) до середины 20-го века осуществлялась только аналоговым образом, как, например, в звукозаписывающей аппаратуре. После изобретения аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и совершенствованная цифровой электроники стало возможным записывать и сохранять в цифровом виде данные различных электрических сигналов, в том числе и с вибрационных датчиков.

Создание цифрового регистратора послужило мощным импульсом к совершенствованию методов цифровой обработки сигналов. Регистраторы характеризуются числом каналов для записи, числом разрядов преобразования, и частотой опроса (дискретизации). Данные параметры подбираются под конкретную задачу, так как обычно они связаны: при высокой частоте дискретизации снижается разрядность или число каналов. Совершенствование технологий привело к увеличению разрядности АЦП до 24 в массовых изделиях в настоящее время. Наличие достаточного числа каналов регистратора позволяет производить синхронный сбор данных с нужного числа датчиков. Это открывает более широкие возможности анализа сигналов: можно вы-

числять задержки по приходу фронтов сигналов или анализировать собственные формы колебаний. Также можно синхронизировать разные независимые регистраторы по кабелю, в том числе и по сети Ethernet. Однако существует и беспроводной способ синхронизации с помощью систем спутниковой навигации, который превышает точность кварцевых генераторов.

Современные вибрационные датчики можно классифицировать по различным параметрам: способу крепления (контактные и бесконтактные), по преобразуемой величине (виброскорость, виброускорение), частотному и амплитудному диапазону, чувствительности.

Известны и широко применяются бесконтактные методы измерения вибрации: лазерные, ультразвуковые, с помощью видео и др. Например, лазерный интерферометрический датчик оценивает виброскорость с помощью эффекта Доплера. Однако эти датчики хороши для лабораторных испытаний, но не всегда подходят для оценки вибраций сооружений, так как такой датчик должен располагаться вне вибрирующей конструкции и быть неподвижным, что тоже является проблемой.

Контактные датчики предполагают надежное соединение с исследуемым объектом. Чувствительный элемент обычно представляет массу на пружине, а преобразование механического движения может быть осуществлено разными способами: электромагнитным, пьезокерамическим, емкостным и т.д. Существуют и электронно-молекулярные датчики, где в качестве массы, на которую воздействуют вибрации, служит электролит. Технологическая миниатюризация позволила производить акселерометры на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Характерные размеры такого датчика составляют миллиметры, и он умещается в стандартные корпуса микросхем. Тенденция последних лет – объединение в одном корпусе датчика и аналого-цифрового преобразователя. Таким образом производится готовый цифровой акселерометр, который может подключаться напрямую к шине микрокон-

троллера. Получается объединение регистратора и датчика в одном устройстве, для синхронизации которых можно применять описанные выше методы. Потребление энергии неуклонно снижается, что дает возможность создавать компактные автономные устройства на их основе.

В настоящее время мобильные платформы, на основе которых изготавливают смартфоны, уже содержат трехкомпонентные МЭМС акселерометры, амплитудный диапазон которых обычно составляет  $\pm 2g$ , что позволяет также контролировать постоянную составляющую поля земного тяготения и на основе сравнения трех ее компонент определять наклон устройства. Телефонные акселерометры в общей массе пока еще не способны ощущать вибрации уровнем ниже  $0,01 \text{ м/с}^2$ , а также они ограничены частотой до 500 Гц. Но выпускаются акселерометры МЭМС с заметно лучшими параметрами как по чувствительности, так и по частотному диапазону.

Нужно отметить, что в последние годы актуальность приобретают оптико-волоконные акселерометры, построенные, например, на решетке Брэгга в качестве чувствительного элемента. Вибрационный сигнал искажает решетку Брэгга, расположенную в акселерометре, изменения спектра отражения которой регистрируются специальным анализатором оптических сигналов, называемым интеррогатором. Таким образом вибрация преобразуется в оптический сигнал, который можно передавать по волокну на значительные расстояния. На одном волоконном канале может работать независимо без перекрытия диапазонов несколько таких вибродатчиков. Частота опроса датчика достигает нескольких десятков кГц. Помимо этого, развиваются технологии, позволяющие получать вибрационный сигнал непосредственно с оптоволоконного кабеля. В настоящий момент они находят применение для выявления сейсмических волн в длинных волоконных линиях. Предполагается, что в будущем с удешевлением производства такие системы будут широко распространены.

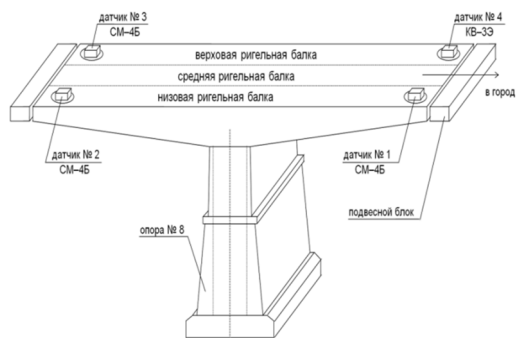
**В качестве примеров** развития методов измерения вибрационных параметров ответственных инженерных конструкций можно привести ряд работ, выполненных сотрудниками Института механики сплошных сред УрО РАН. Четверть века назад в 1996-97 состоялись исследования конструкций мостового перехода через р. Каму в г. Перми (Коммунальный мост), которые включали также измерение вибраций на ригелях одной из опор. Среди участников динамического эксперимента были следующие сотрудники: И.Н. Шардаков, Н.В. Писцов, А.И. Судаков, А.А. Адамов, М.А. Кулеш, О.А. Шадрин и др.

Для измерений применялись сейсмоприемники маятникового типа производства КБ Геофизического приборостроения РАН [1]: 3 акселерометра СМ-4Б (масса 2,5 кг) и 1 велосиметр КВ-3Э (масса 8,2 кг), которые фиксировали вертикальную компоненту вибрации от движущегося транспорта. Данные акселерометры в частотном диапазоне от 0,01 до 10 Гц (20 Гц в зависимости от модификации) позволяли преобразовывать виброускорения амплитудами до  $7 \text{ м/с}^2$  в электрический сигнал, записываемый регистратором на базе ЭВМ с АЦП L-card L-1610. Регистратор имел разрядность 16 бит и частоту опроса 100 Гц. Фактически он фиксировал сигналы выше порога в 1мВ, что без использования предусилителя для датчика СМ-4Б соответствовало значению виброускорения  $0,001 \text{ м/с}^2$ , а для велосиметра КВ-3Э соответствовало значению виброскорости  $10^{-5} \text{ м/с}$ . Расположение датчиков во время эксперимента показано справа на рис. 1, б [2].

Соединение датчиков с регистратором осуществлялось посредством кабелей, по которым передавалось также питание сейсмоприемников, на расстояние до 150÷200 м. Необходимо отметить, что развертывание данного комплекса занимало продолжительное время, так как нужно было не только развернуть кабельные линии, но и установить, подготовить к работе сейсмоприемники, а также вывести их на рабочий режим. Поэтому цикл испытаний занимал несколько часов и произво-



а



б

Рис. 1. Фото моста (а) и расположение датчиков, во время эксперимента 1997 г. (б)

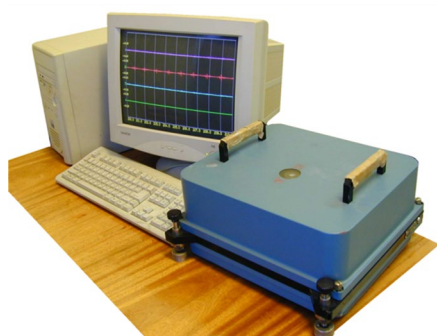
дился в ночное время. В результате обработки экспериментов были установлены низшие собственные частоты конструкции: 0,6–1 Гц и 2,0–2,6 Гц [2].

В дальнейшем измерительный комплекс модернизировался, в его состав были включены трехкомпонентные сейсмоприемники: велосиметр ТС1 (диапазон частот от 0,5 Гц до 25 Гц) и акселерометр ТС-5А.П. (диапазон частот от 0,001 Гц до 20 Гц). Эти приборы представляли эволюцию представленных выше однокомпонентных сейсмоприемников, содержащих в одном корпусе по три блока, которые ориентированы по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Это увеличивало габариты и вес изделия (например, ТС1 весит порядка 28 кг). Однако важно отметить широкий динамический диапазон этого сейсмоприемника, позволяющий в чувствительном режиме преобразовывать колебания от  $10^{-8}$  м/с. Внешний вид регистратора и датчика ТС1 представлен на рис. 2, а. Необходимо отметить, что расширение функционала

за счет применения трехкомпонентных датчиков, потребовало специальных 10-жильных кабелей, так как использовались дифференциальная схема подключения для каждого канала и двухполярное питающее напряжение. Это дополнительно увеличивало жесткость кабелей и вес мобильного комплекса, что сказывалось на времени подготовки к эксперименту.

Немного позднее, в 2005 г., появилась версия цифрового регистратора сейсмических сигналов (ЦРСС) на основе ноутбука с независимыми предусилителями для каждого канала. Регистратор (рис. 2, б) выполнен на базе внешнего 16-канального 14-разрядного АЦП L-card E14-440. Такой регистратор позволял проводить автономные измерения в широком диапазоне амплитуд вибраций за счет встроенных усилителей сигналов на каждом канале с коэффициентами от 1 до 64.

В 2005 году сотрудники института принимали участие в сдаточных испытаниях первой очереди Красавинского мостового перехода, которые также включали



а



б

Рис. 2. Внешний вид первого регистратора с трехкомпонентным сейсмоприемником ТС1 (а) и второго регистратора ЦРСС (б)

в себя измерения вибрационного отклика на движение транспорта [3]. На рис. 3 приведены фотографии датчиков во время экспериментов.

В результате измерений установлены спектры частот колебаний конструкции в середине моста. Двухкратное интегрирование вертикальной компоненты виброускорений позволило оценить изменения прогиба моста между опорами, возникающего при движении пары автомобилей [4]. На рис. 4 показаны вертикальная компонента виброускорения, записанная с датчика, и квазистатический прогиб. Эта оценка прогиба совпадает с расчетной, что свидетельствует о высоком динамическом диапазоне акселерометра ТС-5А.П. в области низких частот, на который практически не оказали влияние вибрации.

На рис. 5 приведены вейвлет-спектры сигналов виброускорения и виброперемещения, на котором наблюдается доминирующая частота конструкции, равная 0,5 Гц.

Описанное выше оборудование неоднократно применялось для оценки вибраций зданий от воздействия транспорта, сваябойных работ и технологических процессов. Важно отметить первый опыт деформационного мониторинга здания, полученный сотрудниками института. Помимо различных деформационных параметров здания, расположенного на карсте, отслеживалась эволюция его собственных (доминирующих) частот. Слабые вибрации естественного фона фиксировались в подвале здания одним трехкомпонентным сейсмоприемником с ноября 2007 по апрель 2010 г. Независимо

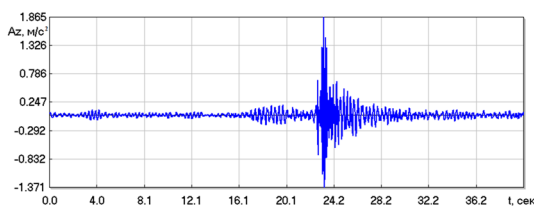


а

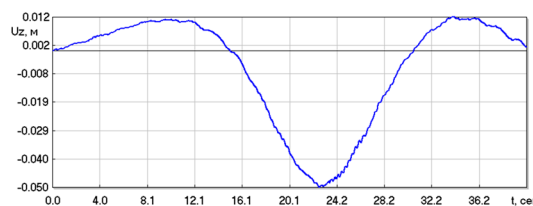


б

Рис. 3. Трехкомпонентные сейсмоприемники ТС-5А.П. (а) и ТС1 (б) во время испытаний моста в 2005 г.



а



б

Рис. 4. Вертикальная компонента виброускорения (а) и соответствующий ей прогиб (б)

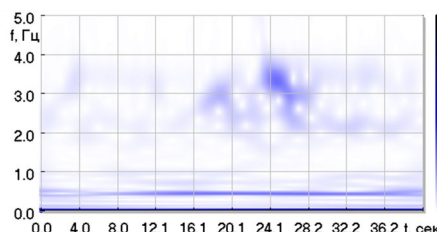
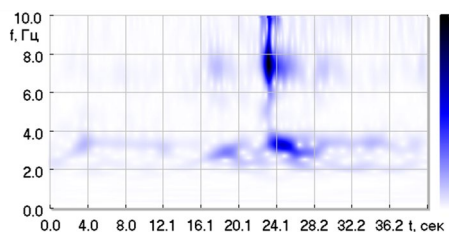


Рис. 5. Вейвлет-спектры сигналов с рис. 4

были проведены разовые измерения на крыше здания с помощью представленного выше оборудования, которые помогли идентифицировать значения собственных частот конструкции. На рис. 6 показана эволюция доминирующей частоты за 2,5 года наблюдения [5]. Ее изменения в зимний период связаны с промерзанием грунтов, взаимодействующих со свайным основанием.

Также интересный эксперимент [6, 7] по исследованию вибраций на магистральном трубопроводе был проведен совместно с использованием описанного выше измерительного комплекса и волоконно-оптическими акселерометрами, установленными и разработанными сотрудниками Пермской приборостроительной компании.

В 2013 году возможности проведения мобильных вибродиагностических исследований были улучшены с приобретением оборудования фирмы Zetlab, что позволило также расширить частотный диапазон исследований до 400 Гц. Это дало возможность проводить вибродиагностику конструкций и меньшего масштаба. На рис. 7

показан регистратор – автономная 16-канальная сейсмостанция Zetlab и ВС1313, позволяющий измерять ускорения до  $10 \text{ м/с}^2$ ; с уровнем собственных шумов  $4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ . Данная станция может регистрировать воздействия с частотой дискретизации до 2 500 Гц полностью автономно без компьютера, а также обеспечивать питанием датчики, вес которых составляет порядка 1,2 кг. Подготовка этих датчиков к измерениям занимает меньше времени, чем маятниковых сейсмоприемников, что благоприятно сказывается при развертывании комплекса.

С помощью данного комплекса производились виброизмерения модельной железобетонной конструкции, а также грунтов от воздействия транспорта, в том числе железнодорожного [8]. Указанные трёхкомпонентные акселерометры ВС 1313 применялись при мониторинге надшахтной конструкции [9].

Представленные примеры из истории работ Института показывают эволюционные изменения в области проведения виброизмерений крупномасштабных конструкций.

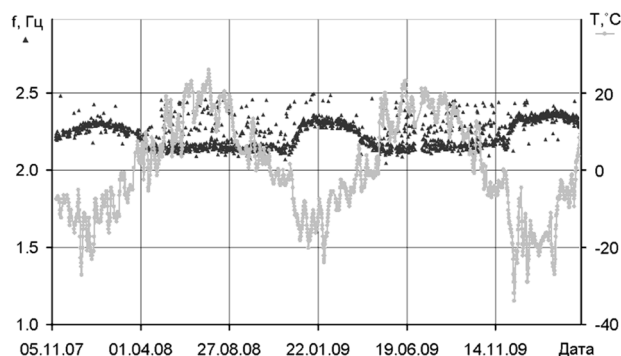


Рис. 6. Эволюция доминирующей частоты поперечной компоненты виброперемещений в процессе мониторинга



Рис. 7. Сейсмостанция Zetlab ZET 048-E16 и сейсмоприёмник ВС 1313

На сегодняшний день измерение вибраций сооружений возможно с помощью МЭМС акселерометров, в том числе посредством смартфона. С его помощью в 2023 г записан вибрационный отклик от проезжающего транспорта на том же самом мостовом переходе, что и в эксперименте 1997 г. Смартфон располагался наиболее близко к позиции датчика № 3 на рис. 1. На рис. 8 представлена соответствующая виброграмма вертикальной компоненты виброускорения при проезде деформационного шва грузовым транспортом (бетономешалка), она получена при частоте дискретизации 500 Гц. Как видно из графика, возможности современного смартфона позволяют фиксировать колебания мостовой конструкции от подобных воздействий. Также приведены вейвлет-спектры виброускорений в низкочас-

тотной области: один из них соответствует проезду авто, полученным четверть века назад с датчика 3 (рис. 1), а второй – сигналу, представленному на рис. 8.

Данный иллюстративный пример показывает возможности современных технологий. Эти измерительные средства могут осуществлять вибродиагностику без применения громоздкой аппаратуры, длительной подготовки и существенных затрат, различного рода ресурсов. Несмотря на то что датчики МЭМС уступают в плане чувствительности сейсмоприемникам 20-летней давности (типа ТС1), полученные сигналы позволяют осуществлять оценку динамических параметров сооружения.

Представленные примеры из истории института показывают эволюционные изменения в течение четверти века в области вибродиагностики конструкций.

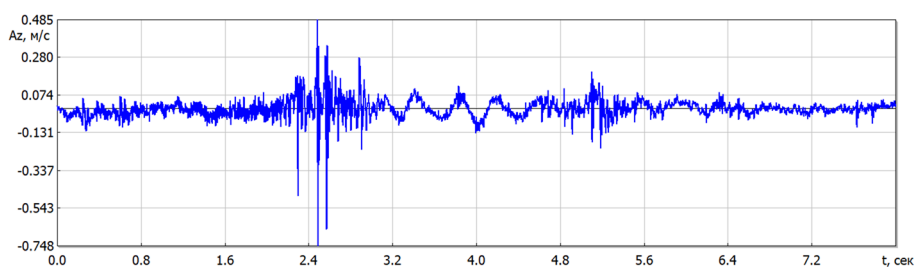


Рис. 8. Вертикальная компонента виброускорения мостового перехода, полученная со смартфона

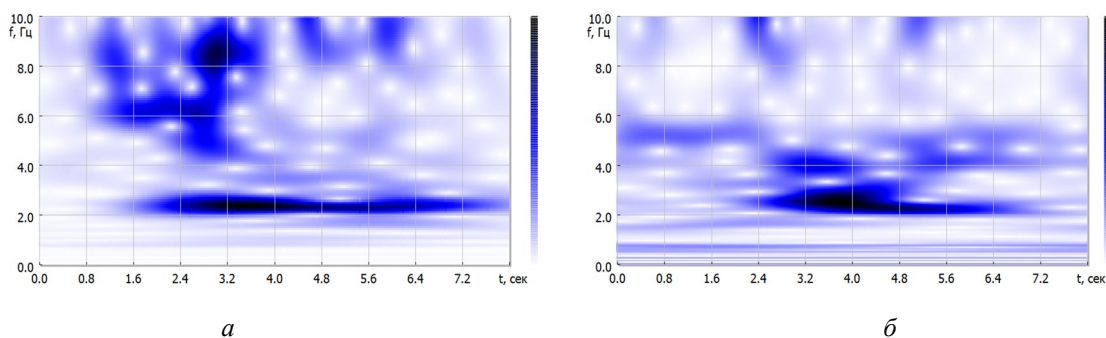


Рис. 9. Вейвлет спектр виброускорений в области низких частот 1997 г. (а) и 2023 г. (б)

### Библиографический список

1. Башилов И.П. Аппаратура для геоэкологических исследований, мониторинга инженерных сооружений и среды обитания по обеспечению безопасности // Научное приборостроение. – 2001. – Т. 11. – № 3. – С. 92–99.
2. Кулеш М.А., Шардаков И.Н. Вибродиагностика автомобильного моста (эксперимент, численная обработка, анализ) // Вестник ПГТУ. Вычислительная математика и механика. – 1998. – С. 73–80.
3. Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Цветков Р.В. [и др.] Измерение, обработка и анализ результатов динамических испытаний нового мостового перехода через реку Кама // Материалы международной



- научно-технической конференции «Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного и трубопроводного транспорта в Уральском регионе». – Пермь, 2005. – С. 10–15.
4. Цветков Р.В. Вибродиагностика «Красавинского» мостового перехода // Труды конференции молодых ученых «Поздеевские чтения». – Пермь, 2006. – С. 132–136.
  5. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – №2. – С. 153–167.
  6. Shardakov I., Glot I., Shestakov A., Tsvetkov R. Experimental study of dynamic deformation processes in gas pipeline // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 28. – P. 1795–1801. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.001>.
  7. Glot I.O., Shardakov I.N., Shestakov A.P., Tsvetkov R.V. Analysis of wave processes in an underground gas pipeline (mathematical model and field experiment) // Engineering Failure Analysis. – 2021. – Vol. 128. – 105571. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105571>.
  8. Гусев Г.Н., Епин В.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Цветков Р.В. Оценка вибрационного поля от железнодорожного транспорта на территории нового строительства // Известия вузов. Строительство. – 2023. – №5. – С. 94–104. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-773-5-94-104>.
  9. Glot I., Gusev G., Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Vibration-based monitoring of engineering metal structures during technological operations // Procedia Structural Integrity. – 2021. – Vol. 32. – P. 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.031>.

### ON THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR MEASURING VIBRATION OF BUILDING STRUCTURES

G.N. Gusev, V.V. Epin, R.V. Tsvetkov, A.P. Shestakov

*Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS*

#### For citation:

Gusev G.N., Epin V.V., Tsvetkov R.V., Shestakov A.P. On the development of methods for measuring vibration of building structures // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 4. – P. 32–40. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.4.3>

Vibration processes contain useful information about the properties of both the signal source and the medium in which they propagate. Control of vibration parameters of structures is an integral part of monitoring. There are various methods and means of measuring vibration processes in building structures, as well as their registration. The development of technology and electronics allows us to steadily improve the parameters of vibration sensors, reduce their dimensions and create fundamentally new sensitive elements. Examples are given of vibration measuring equipment used by the staff of the Institute of Continuous Media Mechanics for testing large-scale building structures over the past 25 years. The results of vibration measurements of large-scale structures are shown, as well as the evolution of the natural frequency of a building structure during its long-term monitoring.

*Keywords: vibration, large-scale structure, building structure, seismometer, accelerometer.*

#### Сведения об авторах

Гусев Георгий Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: [gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru)

Епин Валерий Валерьевич, младший научный сотрудник механики функциональных материалов, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [epin.v@icmm.ru](mailto:epin.v@icmm.ru)

Цветков Роман Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [flower@icmm.ru](mailto:flower@icmm.ru)

Шестаков Алексей Петрович, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [shap@icmm.ru](mailto:shap@icmm.ru)

*Материал поступил в редакцию 24.11.2023 г.*