

ЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВ*

Б.Е. Резник (Берлинский университет прикладных наук, Германия)

В 1982 г. окончил маркшейдерский факультет Ленинградского горного института (в настоящее время - Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова) по специальности «прикладная геодезия». После окончания института до 1992 г. работал во ВНИМИ (Санкт-Петербург). В настоящее время — профессор инженерной геодезии и геоинформатики Берлинского университета прикладных наук (BHT Berlin). Кандидат технических наук.

В.Я. Лобазов (НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК)

В 1980 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института служил в 29-м НИИ МО РФ. С 1989 г. работал научным сотрудником ГИПРОЦВЕТМЕТ. С 1992 г. по настоящее время — руководитель НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК.

А.Ю. Герасимов (НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК)

В 2003 г. окончил Московский колледж геодезии и картографии с присвоением квалификации «техник-геодезист», в 2004 г. получил квалификацию «геодезист». В 2009 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «космическая геодезия». С 2007 г. работает в НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК, в настоящее время — инженер.

П.С. Эфендян (Государственный аграрный университет Армении)

В 1974 г. окончил Киевский инженерно-строительный институт (Украина). В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию в МИИГАиК. В настоящее время — декан факультета гидромелиорации, землеустройства и земельного кадастра Государственного аграрного университета Армении.

Известно, что сооружения с «легкими» несущими конструкциями, имеющие собственные низкие частоты колебаний и небольшие коэффициенты затухания, в результате воздействия на них внешних нагрузок (ветра, транспорта и др.) могут совершать колебания с большими амплитудами. Характер таких колебаний может быть вычислен для любых несущих конструкций с помощью специальных математических алгоритмов и компьютерных программ. Опыт показывает, что результаты, полученные на основе теоретических вычислений, часто отличаются от частотных харак-

теристик, определенных в процессе измерений. Таким образом, измерения позволяют уточнить соответствующие математические модели и, кроме того, контролировать состояние несущих конструкций в процессе эксплуатации.

Классическими геодезическими методами, имеющими ограничения по частоте измерений в 10–20 Гц, можно определить быстро проходящие процессы с частотами до 5–10 Гц (см. Геопрофи. — 2010. — № 1. — С. 17–21). В то же время решающее значение при анализе поведения несущих конструкций играет разделение реаль-

ных деформаций и эффектов, возникающих в результате инструментальных погрешностей измерения и применяемых методов обработки. Практический опыт использования электронных тахеометров и спутниковых приемников для высокочастотных измерений показывает, что полученные результаты часто бывают искажены сильными систематическими ошибками, которые, в основном, имеют периодический характер. Поэтому доверительный интервал должен быть уменьшен до 3–5 Гц.

Также известно, что чем больше длина пролетных строений, тем меньше становится частота

* Статья подготовлена в рамках сотрудничества научных и производственных организаций России, Германии и Австрии (см. Геопрофи. — 2009. — № 6. — С. 19–21).

первых резонансных частот. При особенно протяженных пролетах мостов, длиной более 50 м, эти частоты попадают в названный выше диапазон. Чтобы получить реальную картину деформаций, часто требуются проводить измерения более высоких резонансных частот, которые могут быть определены измерителями ускорений различного вида.

▼ Реализация частотных измерений

Измерения колебаний строительных конструкций могут выполняться как переносными датчиками, так и установленными на длительное время автономными измерительными системами. В первом случае измерения проводят периодически, и результаты сравнивают с «нулевым циклом», по принципу, схожему с классическими геодезическими деформационными наблюдениями. Последующая обработка облегчается, если контрольные пункты размещены на характерных точках вдоль одной строительной оси. Для повторной установки датчиков местоположение контрольных пунктов маркируют. Если сооружение должно быть обследовано с высокой точностью и с большей периодичностью измерений, то на одном или нескольких таких пунктах может быть установлена постоянная измерительная система. Она записывает измерения через заданные интервалы времени или при достижении определенных значений, например критических амплитуд колебаний. Результаты передаются оператору современными средствами коммуникаций с заранее заданным интервалом времени или в критических ситуациях. Если результаты показывают необычные смещения резонансных частот, то объекты должны быть дополнительно обследованы для принятия мер по предотвращению негативных последствий. Контроль величин полученных амплитуд

не является первоочередной задачей, так как их предельные значения за редким исключением неизвестны.

Процесс измерения колебаний может быть легко автоматизирован, отличается высокой надежностью и поэтому имеет большой потенциал в рамках мониторинга. В мире существует практика применения частотного метода на уникальных объектах и, по мнению многих экспертов, он также может использоваться на обычных строительных сооружениях как дополнение к другим типам измерений. При этом измерения колебаний необходимо выполнять одновременно на многих пунктах. Но стоимость датчиков для измерения микросейсмических колебаний (сейсмографов), регистрирующих малейшие колебания земной поверхности, достаточно велика и для поставленных целей экономически не оправдана.

По названным выше причинам в Берлинском университете прикладных наук была создана альтернативная измерительная система для мониторинга частотным методом. Ее конструктивной особенностью является наличие нескольких чувствительных элементов, присоединенных к полемому компьютеру с помощью кабелей через коммуникационный блок, преобразующий сигнал от датчиков в цифровую форму (рис. 1).

Чувствительными элементами служат датчики, которые используются в машиностроении, при эксплуатации ветряных электростанций и т. д. Они имеют высокую степень пыле- и влагозащищенности (IP 67). Потребление электроэнергии датчиками крайне мало, так что система может работать в течение многих часов без подключения внешнего питания.

По данным изготовителей рабочий диапазон чувствительных элементов составляет $\pm 2g$. Паспортная точность измерений соответствует 1 мг. Хотя частота измерений в зависимости от установки может составлять несколько тысяч Гц, доверительным рабочим диапазоном является частота 50 Гц. Для обеспечения равных условий измерений на всех контрольных точках система может работать с неограниченным количеством датчиков на удалении до 450 м. Из-за нескольких худших параметров точности, чем у геофизических приборов, она не может использоваться для измерения микросейсмических явлений. В то же время ее главным преимуществом является невысокая стоимость.

Для динамических наблюдений все датчики устанавливаются вдоль одной оси. При частоте в 1000 Гц и длительности в 1 минуту регистрируется 60 000 измерений на каждом пункте. Преимущество такого располо-

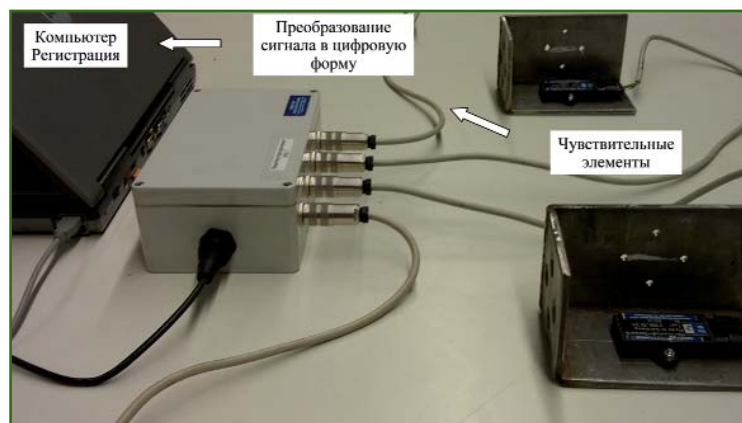


Рис. 1
Измерительная система

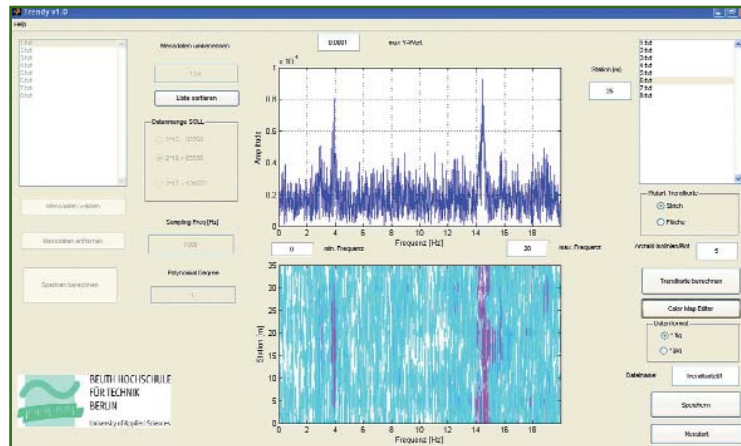


Рис. 2
Интерфейс специализированного программного обеспечения

жения датчиков было подтверждено многочисленными экспериментами. При этом исключается появление ошибок за счет разовых краткосрочных воздействий, и обеспечиваются примерно одинаковые условия на всех датчиках. Общий объем файла данных при использовании 8 датчиков составляет 1 Мбайт на один цикл измерений.

▼ Концепция обработки измерений

Полевые измерения с помощью созданной системы не представляются трудоемкими и

не требуют особых навыков. Результатом измерений одним датчиком является цифровой ряд данных, сортированный по времени. В течение нескольких секунд собираются данные объемом в десятки тысяч измерений. Поэтому обработка и последующий анализ полученной информации требуют специальных математических и технических знаний. Во время разработки описанной системы сложность заключалась в отсутствии программного обеспечения для обработки таких данных. На первом этапе в Берлинском универ-

ситете прикладных наук были разработаны собственные алгоритмы и написаны модули с использованием программы MatLab. После экспериментальных исследований была уточнена методика и создано специализированное программное обеспечение (рис. 2).

Первичным результатом обработки измерений являются так называемые спектрограммы, совмещающие выделенные частоты и соответствующие амплитуды колебаний на характерных точках мостового перехода, отобранных для пробных измерений. Пример испытания приборного комплекса в лабораторных условиях представлен на рис. 3. На рис. 3а (слева) отчетливо виден уровень помех в пределах ± 3 мг. В спектрограмме этих измерений он соответствует величине амплитуды около $3,4 \times 10^{-5}$ и, таким образом, характеризует реальную чувствительность использованных датчиков колебаний. На рис. 3б представлены результаты измерений на массивном бетонном мостовом переходе при сравнительно слабом автомобильном движении. Спектрограмма показывает типичную динамическую характеристику этого инженерного сооружения с пиками выше названного уровня.

При измерениях используется несколько датчиков, поэтому обработка требует совместной интерпретации многочисленных данных. Так называемые картограммы колебаний представляют одновременное изображение всех спектров по одной из осей конструкции (рис. 4). Из соображения наглядности используется двухмерное изображение по частоте и длине конструкции. Амплитуды отдельных спектров показываются разными цветами в соответствии с выбранной шкалой. Такая форма представления результатов используется в картографии для показа относительных статистических дан-

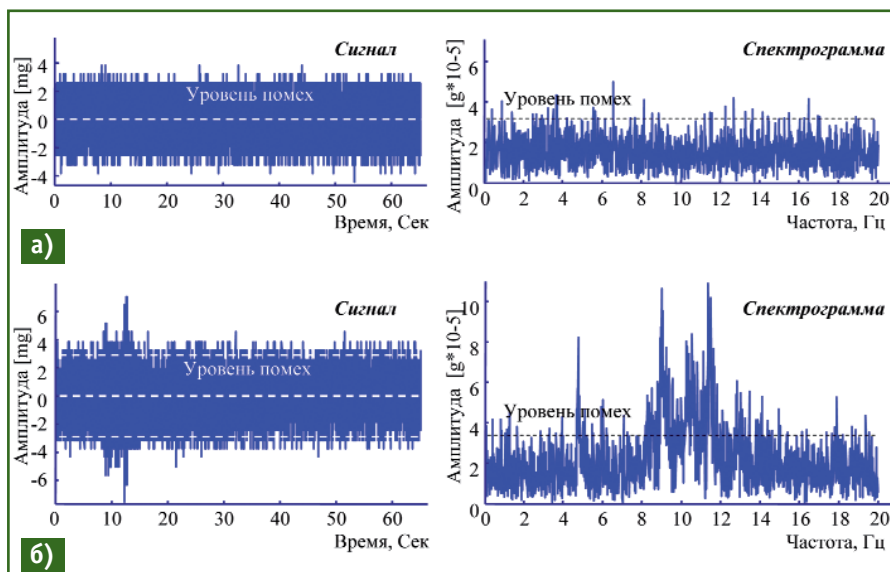


Рис. 3

Принцип применения спектрограмм:

а) измерения в лабораторных условиях без внешних воздействий;

б) измерения на мостовом переходе со слабым автомобильным движением

ных цветовой заливкой, соответствующей принятой интервальной шкале. Благодаря ей легко оценить энергию отдельных частот по всей длине несущей конструкции.

Так как основные шаги обработки, такие как вычисление отдельных спектров и картограмм колебаний, выполняются в подготовленной программе нажатием нескольких кнопок, визуальный контроль можно осуществлять на полевом компьютере сразу после завершения измерений. И спектрограммы и картограммы колебаний можно сохранить в различных графических форматах для дальнейшего анализа и интерпретации.

▼ Практическая реализация концепции частотного мониторинга

Многие проекты, выполненные авторами в последние годы, доказали, что и измерительная система, и программное обеспечение позволяют успешно проводить контроль и интерпретацию высокочастотных деформаций. Этот факт был также подтвержден измерениями на уникальном автомобильном мосту в Ереване (Армения) при участии специалистов из Государственного аграрного университета Армении.

Давидашенский мост — важное инженерное сооружение транспортной инфраструктуры Еревана (рис. 5). Он отличается необычной конструкцией: при длине моста в 500 м и ширине 32 м высота опор достигает 92 м. Мост имеет легкое верхнее строение из стали и нижние строения, состоящие из двух устоев и трех промежуточных опор из железобетонных блоков размером 5х3,8 м. Уже во время его строительства было известно, что из-за такой конструкции сооружение при определенной ветровой и транспортной нагрузке будет совершать колебания с большой амплитудой. С помощью разработанной методики в 2009 и 2010 гг. совмест-

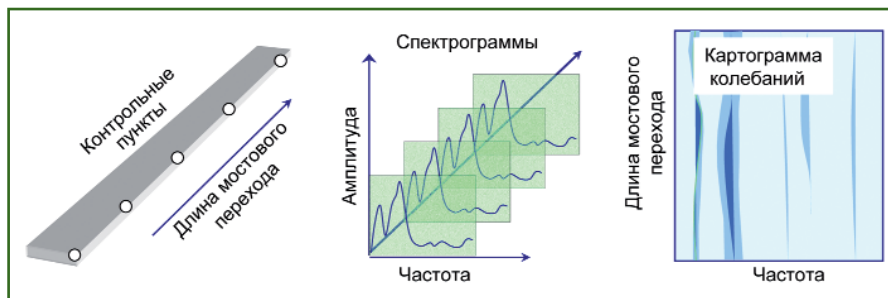


Рис. 4
Принцип применения картограмм колебаний

ными усилиями авторов были выполнены обширные динамические измерения на многочисленных контрольных точках моста. Результаты проведенных работ и их точность свидетельствуют о возможности применения метода и измерительного комплекса для частотных наблюдений.

Так как объем данной статьи не позволяет включить описание всех результатов мониторинга, в ней приведены только измерения на одном характерном участке длиной около 40 м (рис. 5). На данном участке использовались 4 датчика. На всех пунктах и во всех направлениях наблюдения выполнялись, как минимум, дважды. Многократные измерения на этих точках показали высокую сходимость результатов по частотам. Для исследования выбирались интервалы времени с особенно интенсивным дорожным движением. Тем не менее, нагрузка и соответствующее распределение амплитуд отдельных частот колебаний даже при интервале повторных измерений в несколько минут могут несколько

отличаться друг от друга. Типичный пример таких результатов представлен на рис. 6.

Известно, что сооружение испытывает незначительные амплитуды колебаний на частотах, значительно отличающихся от собственных. Измерения при нагрузке, вызванной движением транспорта, показывают на обоих графиках однозначную динамическую характеристику несущих конструкций на рассматриваемом участке мостового перехода. Собственные частоты, например 1,4 Гц и 2,2 Гц, однозначно визуализируются как пиковые значения на спектрограммах, а также как светлые линии на картограмме колебаний. Особенно характерное для более высоких частот «размазывание» спектра можно наблюдать на примере собственных частот в интервале 4,0–4,7 Гц.

Спектральные характеристики колебаний моста по высоте при типичной нагрузке на него транспортными средствами, полученные в 2009 и 2010 гг., изображены на рис. 7. Несмотря на годовой интервал между измерениями на графиках вид-



Рис. 5
Давидашенский мост в Ереване с обозначенным участком измерений

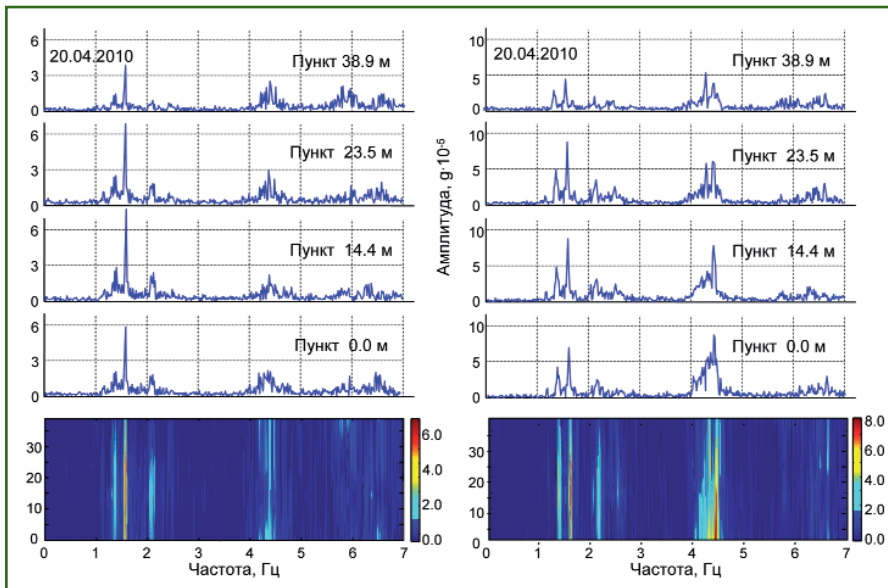


Рис. 6

Спектральные характеристики колебаний моста по высоте, полученные в 2010 г.

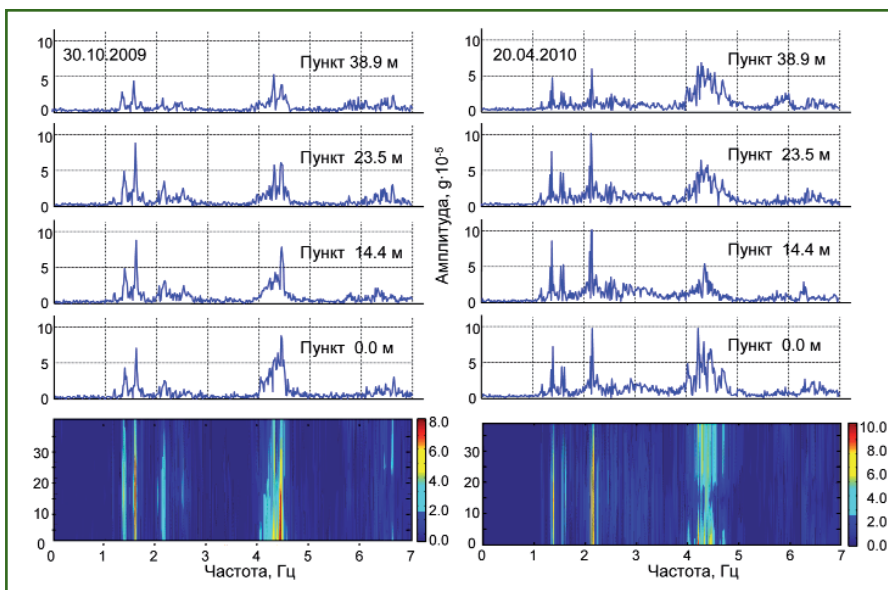


Рис. 7

Спектральные характеристики колебаний моста по высоте, полученные в 2009–2010 гг.

но, что определенная амплитудно-частотная характеристика несущих конструкций не претерпела за это время существенных изменений. Планируется в рамках будущих ежегодных инспекций повторять описанные измерения и сравнивать их с измерениями нулевого цикла. Дальнейшая стабильность выявленных параметров будет свидетельствовать об отсут-

ствии критических изменений в несущих конструкциях.

Авторы планируют также выполнить расчет колебаний конструкций по методу «конечных элементов» с участием специалистов из Армении. Сравнение «теоретических» и измеренных частот позволит сделать дальнейшие выводы о состоянии отдельных опор и пролетных строений.

На основании накопленного опыта авторы убеждены, что описанные частотные методы мониторинга могут успешно применяться на мостах и других инженерных сооружениях. Эти методы выходят за рамки геодезического контроля и успешно его дополняют. Практическая реализация поставленных задач в будущем потребует интенсивной совместной работы специалистов различных специальностей, в первую очередь, в области геодезии и строительного дела.

В настоящее время готовится новое поколение измерительной системы. Каждый компактный измерительный блок этой системы будет содержать собственный чувствительный элемент повышенной точности и карту памяти большого объема. Устройство будет обладать внутренним источником питания, емкости которого достаточно для автономного выполнения измерений в течение 24 часов, и иметь возможность подключения к внешней сети. Таким образом, новое поколение системы позволит выполнять измерения в автономном режиме практически неограниченное время. В ней также предусмотрена функция автоматического включения измерений при достижении заданных амплитуд колебаний. Посредством технологии Wi-Fi будет организована беспроводная передача информации и аварийных сообщений.

RESUME

Both the necessity and possibility of applying the frequency measurement method for controlling engineering constructions in addition to the traditional geodetic monitoring is substantiated. Hard- and software developed at the Berlin University of Applied Sciences, for the building structures frequency measurement monitoring is described. There are given the results of the frequency monitoring conducted by the authors in 2009–2010 on the road bridge in Yerevan.