

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТАХ

**В.А. Герасимов** (Инжиниринговый центр «Ямал», Санкт-Петербург)

В 1982 г. окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. академика В.Н. Образцова (в настоящее время — Петербургский государственный университет путей сообщения) по специальности «строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство». После окончания института работал в ОАО «Ленгипротранс», с 1992 г. — в ЗАО «Фэцит». С 2003 г. работает в ООО «Инжиниринговый центр «Ямал», в настоящее время — генеральный директор.

**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.

**Б.Е. Резник** (Университет прикладных наук, Берлин, 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 Университета прикладных наук (ВНТ Berlin). Кандидат технических наук.

**А.Н. Саргсян** (Ереванский государственный университет архитектуры и строительства, Армения)

В 1990 г. окончил факультет транспортного строительства Ереванского архитектурно-строительного института по специальности «мосты и тоннели». После окончания института работал в проектно-институте «Армгипротранс» (Ереван). С 2000 г. работает в ООО «Аросса», в настоящее время — главный инженер. С 1998 г. по настоящее время — ассистент на кафедре «Автомобильные дороги и мосты» Ереванского государственного университета архитектуры и строительства. Кандидат технических наук.

Среди основных исследований, выполняемых НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК, отработка методики мониторинга инженерных сооружений занимает важное место. Одним из проектов в этой области является «Комплексный геодезический мониторинг мостов в условиях Крайнего Севера», который с 2006 г. ведется совместно с Инжиниринговым центром «Ямал». В 2009 г. для работы по этому проекту был приглашен Берлинский университет прикладных наук, предложивший

новую концепцию проведения мониторинга при помощи высокочастотных измерений, позволяющую повысить качество контроля при одновременном снижении трудозатрат. С 2010 г. в проекте участвует также Государственный университет архитектуры и строительства из Армении. Представленные в статье результаты обработки измерений и их анализа с помощью метода конечных элементов доказывают, что предложенный метод позволяет успешно выполнять контроль и

интерпретацию высокочастотных деформаций.

▼ **Концепция высокочастотного мониторинга деформационных процессов железнодорожных мостов в условиях Заполярья**

Известно, что сооружения с «легкими» несущими конструкциями, имеющие собственные низкие частоты колебаний и небольшие коэффициенты затухания, в результате воздействий на них внешних условий, таких как, например, ветер, транспорт, могут колебаться с

большими амплитудами. Определение параметров колебаний несущих конструкций и их математический анализ представляет собой комплекс современных методов наблюдений, обеспечивающих контроль физического состояния сооружений, и дополняющих, таким образом, классические геодезические методы в рамках мониторинга мостов. Мировой опыт применения подобных методов контроля доказывает, что дефекты или повреждения несущих конструкций часто могут быть выявлены уже на начальном этапе, именно благодаря измерению их частотного спектра колебаний. Эти методы позволяют локализовать такие явления, как скрытые трещины в несущих конструкциях. В результате могут быть приняты своевременные меры для устранения подобных нарушений или предотвращения их дальнейшего развития.

Опыт организации высокочастотных измерений и обработки полученных результатов был реализован авторами в 2010 г. на многочисленных мостовых переходах строящейся железнодорожной линии Обская — Бованенково (полуостров Ямал). Практика строительства мостов такого типа и размеров в условиях вечной мерзлоты не имеет аналогов ни в России, ни в мире. В этих условиях значение мониторинга несущих конструкций и его надежности особенно велико. Учитывая удаленность объекта от пунктов опорной геодезической сети на многие сотни километров и высокие требования к точности и объему получаемой информации, при выполнении этого проекта необходимо было найти новые решения, дополняющие классические методы геодезического контроля высокочастотными измерениями [1]. Такие измерения могут быть легко автома-

тизированы, отличаются высокой надежностью и поэтому имеют, по мнению авторов, большой потенциал в рамках мониторинга.

Измерения выполнялись инженерами НИЦ «Геодинамика» при помощи приборного комплекса, разработанного в Берлинском университете прикладных наук совместно с предприятием JHG (Берлин, Германия). Основой данной системы являются компактные электронные измерители ускорений. Эти датчики совмещают сравнительно невысокую стоимость с достаточным для поставленных задач диапазоном измерений амплитуд в  $\pm 2g$  и частотами до 50 Гц. Паспортная точность измерений составляет около 2%. Приборный комплекс позволяет проводить одновременные измерения и регистрацию данных при использовании до 8 закрепленных на несущих конструкциях компактных чувствительных элементов, которые соединяются с полевым компьютером с помощью специальных кабелей. Измерения колебаний на строительных конструкциях этой системой выполняются периодически, и результаты сравниваются с «нулевым циклом» по принципу, схожему с классическими геодезическими деформационными наблюдениями [2].

Результатом обработки измерений являются спектрограммы, показывающие зависимость амплитуд колебаний от их частот. Такие графики составляются для всех характерных точек мостового перехода, отобранных для измерений. Отдельные спектрограммы очень наглядны, но не позволяют непосредственно сравнивать результаты различных наблюдений друг с другом и, таким образом, выделять из них закономерности. Этот недостаток преодолевается за счет подготовки картограмм колебаний, на которых могут быть одновременно изображены результаты измерения на многих характерных точках мостового перехода (рис. 1).

Последующую обработку можно облегчить, разместив датчики на характерных точках вдоль одной строительной оси. Если результаты показывают необычные смещения резонансных частот и других параметров, то эти объекты должны быть дополнительно обследованы для принятия мер по предотвращению негативных последствий. Полевые измерения с помощью созданной системы не представляются трудоемкими и не требуют особых навыков. Однако обработка и особенно последующий анализ информации требуют достаточно обширных математических и

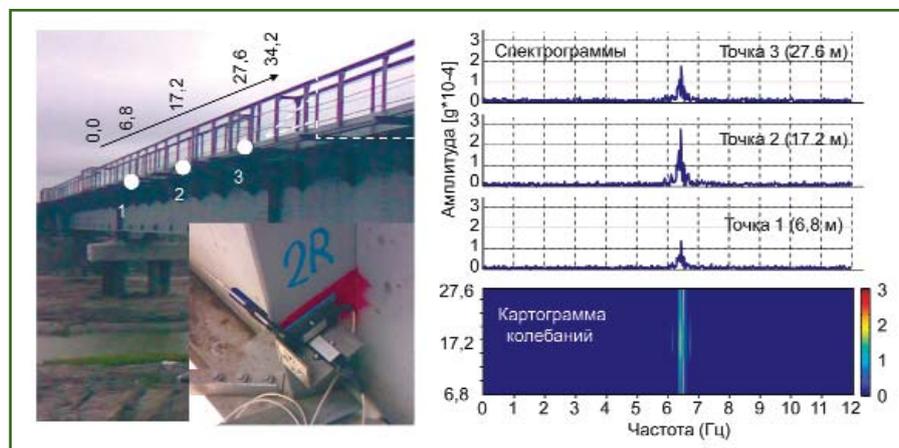


Рис. 1

Типичные результаты обработки высокочастотных измерений

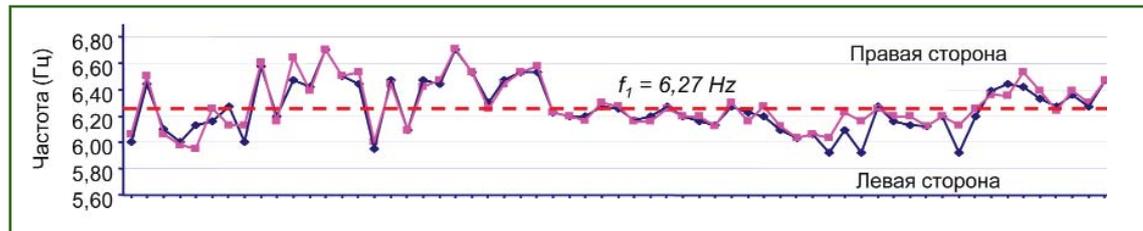


Рис. 2

Результаты анализа измерений для типового мостового пролета

технических знаний. Представленные в статье результаты были получены с помощью программного обеспечения, разработанного в последние годы в Берлинском университете прикладных наук.

Так как объем данной статьи не позволяет включить описание всех результатов измерений и их обработку, здесь представлен только один тип пролетного строения длиной 34,2 м. Пролетное строение этого типа выполнено из двух стальных двутавровых балок сплошного сечения, расположенных в поперечном сечении моста на расстоянии 2,1 м. Балки объединены между собой горизонтальными поперечными связями, которые находятся в верхней и нижней частях балок, а также вертикальными связями. Поперечные связи изготовлены из прокатных уголков. На каждом таком пролете крепилось по 3 датчика для измерения резонансных частот в направлениях колебаний моста. Места установки были постоянны для пролетов всех мостов для удобства сравнения и проведения последующего анализа. Датчики фиксировались струбцинами через металлические уголки в заданном направлении.

Отобранные результаты анализа измерений для типовых мостовых пролетов длиной 34,2 м по высоте изображены на рис. 2. Известно, что сооружение испытывает незначительные амплитуды колебаний, если их частоты серьезно отличаются от его собственных. Так называе-

мые первые собственные частоты со средней величиной 6,27 Гц однозначно визуализируются как пиковые значения на всех спектрограммах. Среднее квадратическое отклонение (СКО) от этой величины для всех рассматриваемых пролетов составляло 0,18 Гц, в то время как СКО по двойным независимым измерениям на разных сторонах мостовых переходов не превышало 0,04 Гц. Такое распределение отклонений наглядно доказывает, что выявленные отклонения связаны не с ошибками измерений, а с особенностями соответствующих конструкций. Стабильность выявленных параметров свидетельствует также об отсутствии критических изменений в несущих конструкциях. На некоторых спектрограммах были выявлены типичное для механических повреждений несущих конструкций «размазывание» спектра и дополнительные собственные частоты. После детального обследования этих участков можно будет сделать окончательные выводы о причинах отклонений подобного рода.

#### ▼ Расчет колебаний несущих конструкций типичного моста при помощи метода конечных элементов

Определение амплитудно-частотных характеристик строительных конструкций можно выполнять как с помощью измерительной техники, так и аналитическим способом. В последнем случае для расчетов широкое применение находит метод конечных элементов. Его эффективность связана с воз-

можностью наиболее просто учитывать различные краевые условия, особенности прикладываемых нагрузок, форму рассчитываемых конструкций и т. д. Опыт показывает, что полученные из теоретических вычислений результаты часто отличаются от частотных характеристик, определенных в результате измерений. Таким образом, измерения позволяют уточнить соответствующие математические модели.

Обследование моста показало, что плиты служебных ходов и убежищ выполнены не из железобетонных ребристых плит, как предусмотрено типовым проектом, а из стальных сеток. На основе контрольных замеров геометрических размеров элементов пролетного строения и технических данных, взятых из проекта пролетного строения, были определены его погонный вес  $q = 2,792$  тс/м<sup>2</sup> и момент инерции  $I = 0,18038$  м<sup>4</sup>. Согласно СНиП 2.03.05–84 «Мосты и трубы» величина модуля упругости стали, принимаемая в расчетах, равна  $E = 2,1 \times 10^7$  тс/м<sup>2</sup>.

Одним из преимуществ предлагаемых приборов и метода является то, что запись колебаний сооружения может проводиться без остановки движения по мосту и специальных динамических испытаний. Однако при этом надо учитывать, что колебания пролетных строений мостов от подвижных нагрузок представляют собой сложный процесс [3]. Поэтому для анализа результатов измерений не-

обходимо предварительное определение спектра собственных частот  $\omega_n$ , форм свободных колебаний  $Y_n$  по всем направлениям  $x, y, z$ .

Обычно при теоретическом анализе поведения сооружений принимают следующие допущения:

- сооружения линейно-деформируемы, т. е. колебания системы малы по сравнению с размерами сооружения;

- материал, из которого выполнено сооружение, подчиняется закону Гука;

- влияние внутреннего (неупругого) сопротивления материала не учитывается;

- масса всех элементов сооружения включается в состав массы его несущих конструкций и принимается равномерно распределенной;

- местное изменение жесткости в соединениях, сопряжениях и стыках не учитывается, жесткость стержней постоянна или ступенчато-переменна, опорные устройства и шарниры, если таковые имеются, идеальны;

- влияние низкочастотных колебаний, вызванных продольными и поперечными изгибающими силами, не учитывается.

При практических расчетах мостов аналитическими методами расчетные схемы пролетных строений обычно принимаются плоскими, а балки пролетных строений описываются в виде стержней с заданными жесткостными параметрами. Для наиболее распространенной однопролетной шарнирно опертой балки с пролетом  $L$ , интенсивностью массы  $m$  и жесткостью  $EI$  собственные частоты определяются по формуле [4]:

$$f = (\pi v^2 / 2L^2) \sqrt{EI/m}, \quad (1)$$

где  $v = 1, 2, 3, \dots, n$  — форма колебаний.

Таким образом, принимая изложенные выше предположения,

были вычислены частоты собственных колебаний пролетного строения моста на 354 км железнодорожной линии (табл. 1).

Для сравнения, собственные частоты пролетного строения были вычислены также с применением метода конечных элементов. Численная модель пролетного строения создавалась посредством применения стержневых конечных элементов, которые описывали главные балки пролетного строения и поперечные связи. Такой подход в моделировании пролетного строения полностью согласуется с вышеизложенными предположениями. В табл. 2 приведены величины, полученные при расчете балки пролетного строения на 354 км с применением метода конечных элементов.

Как видно из табл. 1 и 2, величины собственных частот колебаний, полученные аналитическим способом и с применением метода конечных элементов, практически равны, когда пролетное строение описывалось стержневыми элементами. Однако эти результаты не сходятся с данными, полученными во время измерений, описанных выше, где первая форма колебаний характеризуется частотой  $f_1 = 6,27$  Гц (рис. 2).

Дальнейшие исследования показали, что принятые пред-

посылки не могут отражать реальной работы конструкции. Пролетное строение моста — это пространственная конструкция, которая состоит из главных балок, связей, перил и других второстепенных элементов, тем или иным образом связанных с главными балками. Конечно, главные балки являются основным элементом пролетного строения, формирующим его жесткость. Однако во время динамического воздействия в колебательный процесс вовлекаются и остальные элементы моста. Связи, перила и т. д. изменяют жесткостные характеристики пролетного строения, так как они жестко связаны с главными балками. В автомобильных мостах конструкция проезжей части, а в железнодорожных мостах рельсы также изменяют жесткость пролетного строения, поскольку они связаны с главными балками связями с определенной жесткостью. Покажем это на примере исследуемого нами пролетного строения и определим его жесткость с учетом совместной работы главных балок и рельсов. Жесткость рельсов будем рассматривать с учетом расположения их центра тяжести относительно центра тяжести поперечного сечения пролетного строения. Расчеты показывают, что при этом момент инерции пролетного строения составля-

**Частоты собственных колебаний пролетного строения (однопролетная шарнирно опертая балка), вычисленные по формуле (1)**

**Таблица 1**

Форма колебаний	1	2	3	4	5
Частота, Гц	5,11	20,441	45,992	81,763	127,163

**Частоты собственных колебаний пролетного строения (однопролетная шарнирно опертая балка), полученные методом конечных элементов**

**Таблица 2**

Форма колебаний	1	2	3	4	5
Частота, Гц	5,087	20,224	45,038	78,917	127,03

Частоты собственных колебаний пролетного строения (с учетом совместной работы главных балок и рельсов), вычисленные по формуле (1)

Таблица 3

Форма колебаний	1	2	3	4	5
Частота, Гц	5,396	21,583	48,562	86,332	134,893

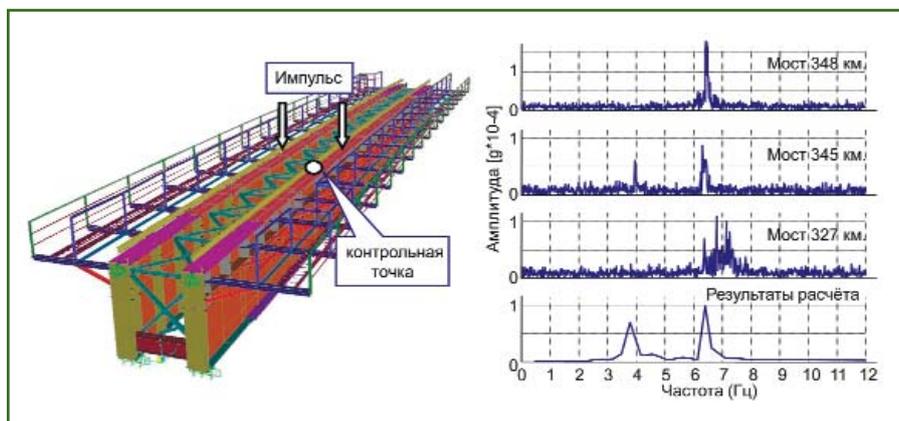


Рис. 3

Спектры частот по натурным измерениям и расчетные по методу конечных элементов

ет  $I = 0,201103 \text{ м}^4$ , а частоты собственных колебаний, вычисленные по формуле (1), соответственно равны параметрам, приведенным в табл. 3.

Однако формула (1) не позволяет учесть совместную работу всех элементов моста. Поэтому была создана точная трехмерная численная модель пролетного строения (рис. 3), которая включала его основные элементы: балки, связи, ребра жесткости, тротуары, рельсы и т. д. Для расчета колебаний несущих конструкций в центре пролета была введена нагрузка в виде импульса, моделирующая вертикальное воздействие. Такой метод нагружения моста обычно принимают для определения динамических характеристик пролетных строений во время его испытаний. На основе проведенного анализа созданной численной модели был получен спектр частот собственных колебаний моста, который представлен на рис. 3. Как видно, спектры частот, полученные во время отобранных натурных измерений и с применением ме-

тода конечных элементов, имеют хорошую сходимость.

Таким образом, для сравнения результатов натурных измерений частот колебаний пролетных строений необходима подробная трехмерная конечно-элементная модель конструкции с учетом всех элементов, участвующих в колебательном процессе. Сравнение спектров частот колебаний пролетного строения, полученных с помощью такой модели и замеренных посредством описанной выше методики или другим образом, может характеризовать соответствие работы пролетного строения проектным данным, а при несоответствии теоретических и измеренных частот — сигнализировать об изменениях в его работе. В этом случае необходимо провести детальное обследование моста для выявления возможных дефектов.

Результаты выполненных работ и их точность свидетельствуют о возможности использования метода конечных элементов для решения поставленных задач. На основании на-

копленного опыта авторы убеждены, что описанные методы мониторинга и разработанный приборный комплекс могут быть успешно применены и для других подобных инженерных сооружений. Практическая реализация таких задач требует интенсивной совместной работы различных специалистов и, в первую очередь, геодезистов и строителей.

#### ▼ Список литературы

1. Герасимов В.А., Лобазов В.Я., Резник Б.Е. Концепция геодезического мониторинга деформационных процессов в условиях Заполярья // Геопрофи. — 2010. — № 1. — С. 17–21.
2. Резник Б.Е., Лобазов В.Я., Герасимов В.А., Эфендян П.С. Частотные измерения при мониторинге автомобильных мостов // Геопрофи. — 2010. — № 4. — С. 11–15.
3. Барченков А.Г. Динамический расчет автодорожных мостов. — М.: Транспорт, 1976. — 199 с.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967. — 444 с.



105064, Москва, ул. Казакова, 13

Тел/факс: (499) 267-27-09, 261-18-32

E-mail: info@geodinamika.ru  
www.geodinamika.ru

#### RESUME

A project is considered on high-frequency measurements and processing the results implemented by the authors in 2010 on numerous bridges of the being constructed railway line Obskaya- Bovanenkovo (Yamal Peninsula). The work results and their accuracy testify the possibility of using the finite element method for solving the tasks. And the described methods of monitoring together with the developed instrument complex can be successfully applied to other similar engineering structures.