

## **Применение метода конечных элементов при анализе высокочастотных измерений на примере железнодорожных мостов в условиях Заполярья**

Герасимов В. А.

Инжиниринговый центр «Ямал»

Лобазов В.Я.

НИЦ «Геодинамика», МИИГАиК

Саркисян А.

Государственный университет архитектуры и строительства, Ереван

Резник Б.

Университет прикладных наук, Берлин.

Одной из основных областей исследований выполняемых НИЦ «Геодинамика», МИИГАиК является отработка методики мониторинга инженерных сооружений. Один из таких проектов «Комплексный геодезический мониторинг мостов в условиях Крайнего Севера» ведётся совместно с Инжиниринговым центром «Ямал» с 2006г. В 2009г. для работы по проекту был приглашен Берлинский университет прикладных наук, предложивший новую концепцию проведения мониторинга при помощи высокочастотных измерений, позволяющую повысить качество контроля при снижении трудозатрат. С 2010г в проекте участвует также Государственный университет архитектуры и строительства Армении. Представленные в статье результаты обработки измерений и их анализа с помощью метода конечных элементов доказывают, что предложенный метод позволяют успешно выполнять контроль и интерпретацию высокочастотных деформаций.

### **1. Концепция высокочастотного мониторинга деформационных процессов железнодорожных мостов в условиях Заполярья**

Известно, что сооружения с «легкими» несущими конструкциями, имеющие низкие собственные частоты колебаний и небольшие коэффициенты затухания, в результате воздействий на них внешних условий воздействий, 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 геометрические методы в рамках мониторинга мостов. Мировой опыт применения подобных методов контроля доказывает, что дефекты или повреждения несущих конструкций часто могут быть выявлены на уже начальном этапе, именно благодаря изменению их частотного спектра колебаний. Эти методы позволяют на самом раннем этапе локализовать такие явления, как скрытые трещины в несущих конструкциях. В результате могут быть предприняты своевременные меры для устранения подобных деформаций или предотвращения их дальнейшего развития.

Опыт организации высокочастотных измерений и обработки полученных результатов был реализован авторами в 2010г. на многочисленных мостовых переходах строящейся ж/д 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 устойчивых точек опорной сети на многие сотни километров и высокие требования к точности и объему получаемой информации, при выполнении этого проекта должны были быть найдены новые решения отвечающим этим требованиям [1]. В этих условиях было принято решение дополнить классические методы геодезического контроля высокочастотными измерениями. Такие измерения могут быть легко автоматизированы, 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, Berlin. Основой этой измерительной 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 герц. 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].

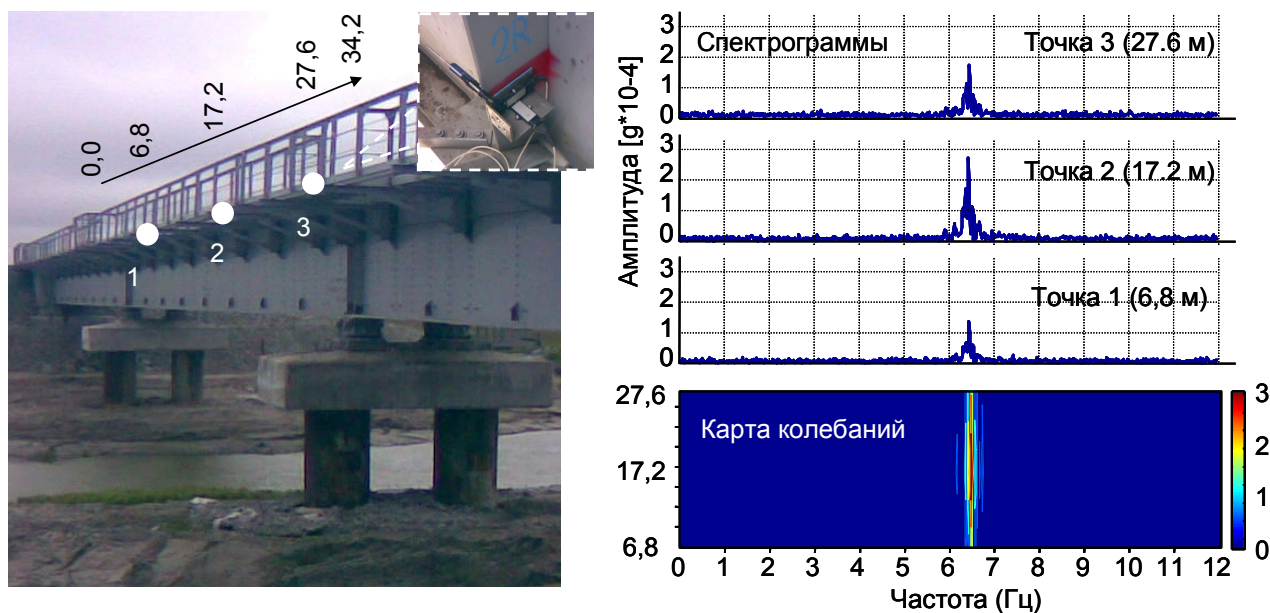


Рис.1. Типичные результаты обработки измерений

Результатом обработки измерений являются спектрограммы, показывающих 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 их закономерности. Этот недостаток преодолевается подготовкой карт колебаний, на которых могут быть одновременно изображены результаты измерения на многих характерных точках мостового перехода (рис. 1).

Последующая обработка облегчается, если контрольные пункты размещаются 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 созданной системой не представляются трудоемкими и не требуют особых навыков. Обработка и особенно последующий анализ информации требуют достаточно обширных математических и технических знаний. Представленные в этой статье результаты были получены с помощью программного обеспечения, разработанного в последние годы в Университете прикладных наук, Берлин.

Так как объем данной статьи не позволяет включить описание всех результатов измерений и их обработки, здесь представлены только один тип пролетного строения длиной 34,2 м. Пролетное строение этого типа с ездой по верху на мостовых брусках выполнено из двух стальных двутавровых балок сплошного сечения, расположенных в поперечном

сечении моста на расстоянии 2.1м. Балки объединены между собой горизонтальными поперечными связями, которые расположены в верхней и нижней частях балок, а также вертикальными связями. Поперечные связи выполнены из прокатных уголков. На каждый пролет этого типа крепилось по 3 датчика для измерения резонансных частот в каждом направлении колебаний моста. Места установки постоянны для каждого пролета всех мостов для удобства сравнения и проведения последующего анализа. Датчики фиксировались струбцинами через металлические уголки, которые использовались для возможности установки измерителя в определенной плоскости.

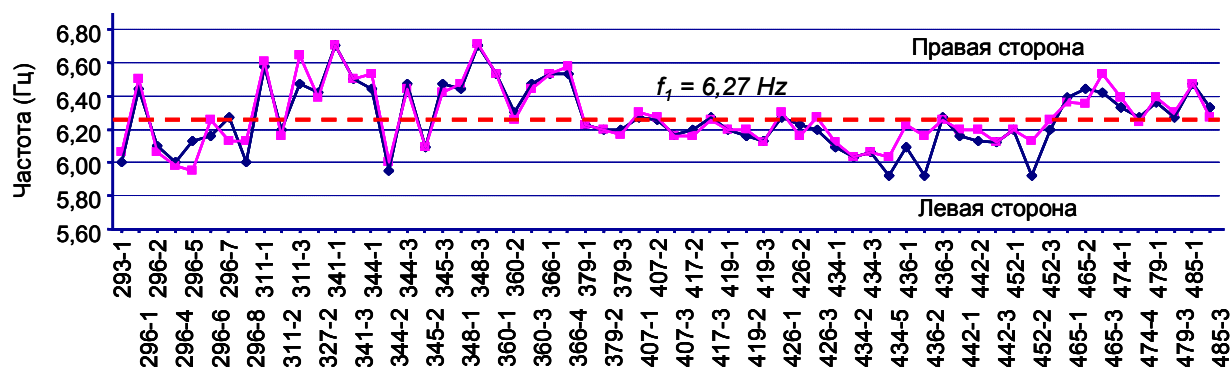


Рис.2. Результаты обработки измерений

Отобранные результаты анализа измерений для типовых мостовых пролётов длиной 34,2 м. по высоте изображены на рис. 2. Известно, что сооружение испытывают незначительные амплитуды колебаний, если их частоты значительно отличаются собственных. Так называемые первые собственные частоты со средней величиной 6,27 Гц однозначно визуализируются как пиковые значения на всех спектрограммах. Среднее квадратическое отклонение от этой величины для всех рассматриваемых пролётов составляет 0,18 Гц в то время как среднее квадратическое отклонение по двойным независимым измерениям на разных сторонах мостовых переходов не превышает 0,04 Гц. Такое распределение отклонений доказывает наглядно, что выявленные отклонения связаны не с ошибками измерений, а с особенностями соответствующих конструкций. Стабильность выявленных параметров свидетельствует также отсутствие критических изменений в несущих конструкциях. На некоторых спектрограммах были выявлено типичное для механических повреждений несущих конструкций «размазывание» спектра и дополнительные собственные частоты. Эти участки будут в дальнейшем дополнительно обследованы, после чего будут сделаны окончательные выводы о причинах отклонений этого рода.

## 2. Расчёт колебаний несущих конструкций типичного моста при помощи метода конечных элементов

Определение амплитудно-частотных характеристик строительных конструкций могут выполняться как с помощью измерительной техники, так и аналитическим способом. В последнем случае для расчетов в последнее время широкое применение находит метод конечных элементов. Эффективность метода связана с возможностью 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 дают возможность уточнить соответствующие математические модели.

Обследование моста показало, что плиты служебных ходов и убежищ выполнены не из ж/бетонных 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 погонный вес

пролетного строения  $q=2.792\text{тс/м}^2$  и его момент инерции  $I=0.18038\text{м}^4$ . Согласно СНиП 2.03.05-84 «Мосты и трубы» величина модуля упругости стали принимаемая в расчетах равна  $E=2.1 \times 10^7\text{тс/м}^2$ .

Одним из преимуществ предлагаемых приборов и метода записи колебаний пролетных строений мостов является то, что запись колебаний сооружения может производиться без остановки движения по мосту и специальных динамических испытаний. Однако при этом надо учитывать, что колебания пролетных строений мостов при движении нагрузок представляет собой сложный процесс [3]. Поэтому для анализа результатов измерений необходимо предварительное определение спектра собственных частот  $\omega_v$ , форм свободных колебаний  $Y_v$  по всем направлениям  $x, y, z$  и интегралов

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, идеальные;
- влияние продольной и поперечной сил изгибных низкочастотных колебаниях не учитываются.

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 пролетом  $L$ , интенсивностью массы  $m$  и жесткостью  $EI$  собственные частоты определяются по формуле [4]

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

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

Таким образом, принимая выше изложенные предпосылки для пролетного строения моста на км354 расчетные частоты собственных колебаний пролетного строения равны:

Таблица 1.

| Форма       | 1    | 2      | 3      | 4      | 5       |
|-------------|------|--------|--------|--------|---------|
| Частота, Гц | 5.11 | 20.441 | 45.992 | 81.763 | 127.163 |

Для сравнения собственные частоты пролетного строения были вычислены так же с применением метода конечных элементов. Численная модель пролетного строения была создана посредством применения стержневых конечных элементов, которые описывали главные балки пролетного строения и поперечные связи. Такой подход в моделировании пролетного строения полностью согласуется с выше изложенными предпосылками. Ниже приведены величины полученные при расчете балки пролетного строения с применением метода конечных элементов.

Таблица 2.

| Форма       | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Частота, Гц | 5.087 | 20.224 | 45.038 | 78.917 | 121.03 |

Как видно из таблиц 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  $f_1=6.3\text{Гц}$ .

Дальнейшее исследования показали, что принятые выше предпосылки не могут отражать реальной работы конструкции. Пролетное строение моста это пространственная конструкция, которая состоит из главных балок, связей, перил и других второстепенных элементов, которые тем или иным образом связаны с главными балками. Конечно главные балки являются тем основным элементом пролетного строения, которые формируют жесткость пролетного строения. Однако во время динамического воздействия пролетного строения в колебательный процесс вовлекаются все остальные элементы моста. Связи, перила и т.д. изменяют жесткостные характеристики пролетного строения, т.к. они жестко связаны с главными балками пролетного строения. В автодорожных 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 жесткость пролетного строения определим с учетом совместной работы главных балок пролетного строения и рельсов. Жесткость рельсов будем учитывать с учетом расположения их центра тяжести относительно центра тяжести поперечного сечения пролетного строения. Расчеты показали, что при этом момент инерции пролетного строения равен  $I=0.201103\text{м}^4$ , а частоты собственных колебаний по формуле (1) соответственно равны:

Таблица 3.

| Форма       | 1     | 2      | 3      | 4      | 5       |
|-------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Частота, Гц | 5.396 | 21.583 | 48.562 | 86.332 | 134.893 |

Однако формула (1) не позволяет учесть совместную работу всех элементов моста. Нами была создана точная трехмерная численная модель пролетного строения (рис. 3), которая включала в себя все основные элементы пролетного строения: балки, связи, ребра жесткости, тротуары, рельсы и т.д. Для расчёта колебаний несущих конструкций в центре пролета была введена нагрузка в виде импульса, которая моделировала вертикальное воздействие. Такой метод нагружения моста обычно принимают для определения динамических характеристик пролетных строения во время испытаний моста. На основе произведенного анализа созданной численной модели был получен спектр частот собственных колебаний моста, который представлен на рис. 3. Как видно, спектры частот полученных во время отобранных натуральных измерений и полученные с применением метода конечных элементов имеют хорошую сходимость.

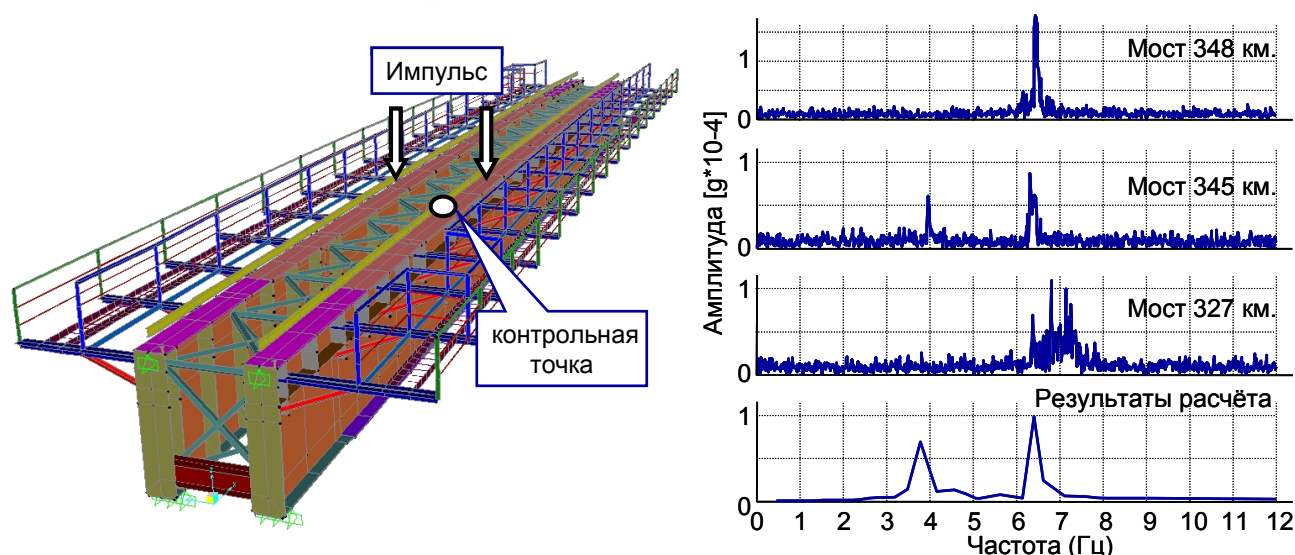


Рис.3. Применение метода конечных элементов

Таким образом, для сравнения результатов натуральных 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 выше описанной методике или другим образом может характеризовать соответствие работы пролетного строения проектным данным, а в случае несоответствия теоретических и измеренных частот сигнализировать об изменениях в работе пролетного строения. В этом случае необходимо провести детальное обследование моста для выявления возможных дефектов.

### **3. Выводы.**

Результаты выполненных работ и их точность свидетельствуют о применимости методов измерений и их анализа с помощью метода конечных элементов для решения поставленных задач. На основании накопленного опыта авторы убеждены, что описанные методы мониторинга и разработанный приборный комплекс могут быть успешно применены и для других подобных инженерных сооружений. Практическая реализация подобных задач требует интенсивной совместной работы специалистов различных специальностей и в первую очередь геодезии и инженеров-строителей. Авторы продолжают работать над усовершенствованием приборов и технологии измерений собственных частот сооружений, а также над усовершенствованием методики моделирования поведения сооружений.

### **Список литературы**

- [1] Герасимов, Лобазов, Резник: Концепция геодезического мониторинга деформационных процессов железнодорожных мостов в условиях Заполярья. Геопрофи, 1/2010. С. 13-17, Москва.
- [2] Резник, Лобазов, Герасимов, Эфендян: Реализация и анализ частотных измерений в рамках мониторинга автомобильных мостов. Геопрофи, 4/2010. С. 11-15, Москва.
- [3] Барченков А.Г. Динамический расчет автодорожных мостов. Транспорт, 1976, 199стр.
- [4] Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Наука, 1967, 444стр.