

КОНЦЕПЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ЗАПОЛЯРЬЯ*

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 «астрономо-геодезия». 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 (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 (TFH Berlin). Кандидат технических наук.

Основными целями наблюдений за деформациями являются оценка устойчивости эксплуатируемых инженерных сооружений и принятие своевременных профилактических мер, обеспечивающих их нормальную работу.

В научно-технической литературе по инженерной геодезии в качестве деформационных измерений обычно понимается создание и уравнивание специальных геодезических деформационных сетей. Понятие «мониторинг» имеет значительно более широкое значение и интерпретируется по-разному. Обобщенное значение мониторинга следующее. Мониторинг — это процесс систематического или непрерывного сбора информа-

ции о параметрах сложного объекта или деятельности для определения тенденций изменения данных параметров [1].

В настоящее время не только специальные приборы, такие как электронные указатели наклонов или смещений, но и классические геодезические приборы (электронные тахеометры, цифровые нивелиры, спутниковые приемники ГНСС и т. д.) могут работать в автоматическом режиме без какого-либо участия наблюдателя. Это значительно расширяет круг геодезического оборудования и технологий, которые могут применяться в периодических геодезических деформационных измерениях, обеспечивая требования непрерывного мониторинга.

Применительно к инженерным сооружениям в последние годы в зарубежной литературе используется понятие Structural Health Monitoring (SHM), которое может быть переведено на русский язык как «наблюдение за состоянием (здоровьем) конструкций». Главным отличием данного подхода к проблеме мониторинга от классических методов контроля является не только его «потенциальная непрерывность», но и цель:

— классический контроль — это контроль отклонений отобранных геометрических параметров от критических величин, определенных в результате теоретических расчетов;

— SHM — это сравнение состояний конструкций (в более

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

Технические возможности современных средств измерений

Тип прибора	Точность измерений	Частота измерений, Гц (одно измерение в секунду)	Геометрические измерения	Частотные измерения
Цифровой нивелир	<1 мм (h)	<0,3	++	0
Электронный тахеометр	1–3 мм (X, Y, h)	<10	++	+
Приемник ГНСС	2–10 мм (X, Y, h)	<20	++	+
Измеритель наклонов	0,01 мрад (γ)	<10	++	+
Измерители ускорений	< 0,01 м/с ² (a)	<500	0	++

Примечание. Принятые обозначения: X и Y — плановое смещение по оси X и Y; h — смещение по высоте; γ — наклон; a — ускорение; + — подходит для измерений; ++ — хорошо подходит; 0 — не подходит.

общем понимании) в различные моменты времени.

При помощи SHM могут быть локализованы опасные отклонения на ранних этапах и предприняты своевременные меры по их устранению или предотвращению дальнейшего развития. При выборе метода SHM должна быть учтена необходимая периодичность (частота) измерений (рис. 1).

Классические геодезические деформационные измерения являются составной частью SHM и предназначены для контроля сравнительно медленно протекающих деформационных процессов, которые можно оценить с помощью периодических, например, ежегодных измерений. В то же время в результате возросших требований к контролю инженерных сооружений и, не в последнюю очередь, благодаря быстрому развитию измерительной и компьютерной техники, все большее значение приобретают высокочастотные методы измерений с периодичностью от одного измерения в час до нескольких десятков измерений в секунду. Современные геодезические методы могут обеспечить практически непрерывные измерения перемещений (деформаций) несущих конструкций, вызванных воздействием таких внешних факторов, как температура окружающей среды, ветровые нагрузки, механические воздействия движущихся транспортных средств и т. п. и успешно дополняют другие методы при контроле состояния объекта.

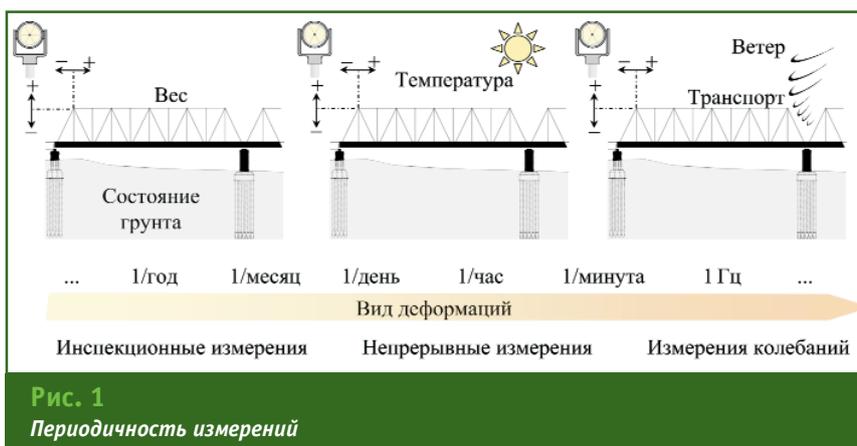


Рис. 1
Периодичность измерений

В соответствии с законами физики периодичность измерений должна не менее чем в два раза превышать наибольшую частоту изменения контролируемых деформаций. Технические возможности классических геодезических методов в настоящее время ограничены частотой в 10–20 Гц (см. таблицу). Таким образом, с помощью существующих геодезических приборов можно контролировать деформационные процессы, протекающие с частотами до 5–10 Гц. Накопленный авторами опыт позволяет утверждать, что в результате систематических погрешностей геодезических приборов в этой области реальная частота контролируемых процессов не должна превышать 2–5 Гц. Если необходима большая частота наблюдений, могут быть применены различные измерители ускорений, которыми, однако, в отличие от геодезических приборов, могут быть определены только относитель-

ные перемещения (колебания, вибрации) контролируемых элементов. Таким образом, эти методы измерений не заменяют классические геодезические методы при контроле геометрических параметров, а только дополняют их в высокочастотном диапазоне.

Геодезический мониторинг на примере железнодорожного моста через р. Юрибей

Опыт организации комплексных измерений для организации SHM и обработки полученных результатов был реализован при разработке проекта мониторинга железнодорожного моста через р. Юрибей, расположенного на 336 км строящейся железнодорожной линии Обская — Бованенково (полуостров Ямал). Длина этого уникального мостового перехода составляет около 4 км, включая 107 пролетов по 34,2 м каждый и русловую часть с двумя пролетами по 110 м. Общее количество опор при этом составляет 110 (рис. 2). Проект



Рис. 2
Общий вид железнодорожного моста через р. Юрибей

с 2006 г. вели Инжиниринговый центр «Ямал» и НИЦ «Геодинамика» МИИГАиК. В 2009 г. для работы по проекту был приглашен Берлинский университет прикладных наук.

Практика строительства мостов такого типа и размеров в условиях вечной мерзлоты не имеет аналогов ни в России, ни в мире. Его значение для программы освоения богатейших газовых месторождений России в этом регионе достаточно высоко. В этих условиях мониторинг несущих конструкций и его надежности занимает важное место.

Учитывая удаленность объекта от устойчивых точек опорной геодезической сети на многие сотни километров и высокие требования к точности и объему получаемой информа-

ции, при выполнении этого проекта нужно было найти новые решения, отвечающие этим условиям.

На основе факторов, определяющих деформационные процессы мостового перехода, таких, как собственный вес, изменения температуры и геотехнических условий, воздействие транспорта и ветра и т. д., определялась периодичность измерений, и выбирались методы наблюдений.

Перед началом первого цикла деформационных измерений на опорах и пролетах моста было установлено более 900 специальных деформационных марок. Так как опоры мостового перехода подвержены сравнительно медленным деформациям, закрепленные на них марки необходимы главным образом для ежегодных инспекционных измерений. Движение контрольных точек на верхнем строении мостового перехода, напротив, зависит в значительной мере от температуры и, особенно, от разницы температур на солнечной и теневой сторонах несущих конструкций. Эти контрольные точки служат также основой для непрерывных деформационных измерений.

▼ Методика контроля суточных деформаций несущих конструкций

На двух основных пролетах мостового перехода общей дли-

ной более 200 м было закреплено по 16 деформационных марок. Марки располагались через равные расстояния на обеих сторонах несущих конструкций в нижней и верхней частях пролетов. Для непрерывных измерений суточных движений этих деформационных марок использовался электронный тахеометр Leica TCA 2003, установленный на контрольной точке RP338-17 (рис. 3), расположенной вне зоны деформаций. Электронный тахеометр дистанционно управлялся с помощью программы GeoMos (Leica Geosystems, Швейцария).

Для контроля положения электронного тахеометра, исключения неизбежных систематических ошибок, связанных с «уводом лимба» и изменением атмосферных условий, дополнительно использовались три контрольные точки (RP338-9, RP338-16 и OR 1), расположенные вне мостового перехода. Они представляли собой отражатели, установленные на штативах.

При выполнении цикла измерений управляемый программой GeoMos тахеометр способен в автоматическом режиме и с заданной частотой находить все марки (отражатели) и измерять расстояния, горизонтальные и вертикальные углы на них. На основе этих данных в режиме реального времени или при последующей (камеральной) обработке вычисляются пространственные координаты деформационных марок с точностью до 1 мм. Порядок измерений в пределах одного цикла (1 цикл — 22 пункта) жестко зафиксирован. Измерения одного полного цикла занимали около 15 минут, что обусловлено, главным образом, скоростью вращения прибора. Суммарно, в течение 24 часов, были собраны данные по 100 циклам наблюдений.

Описанные геодезические измерения позволили получить геометрические параметры (ко-

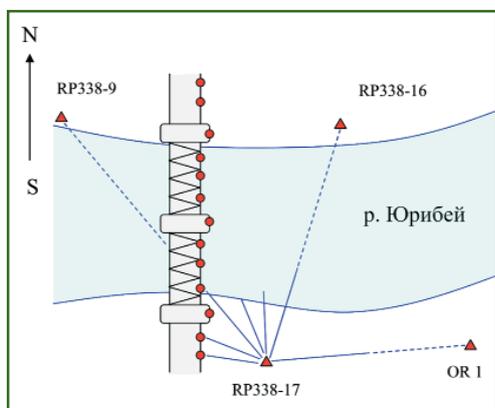


Рис. 3
Схема размещения деформационных марок, электронного тахеометра Leica TCA 2003 и контрольных точек

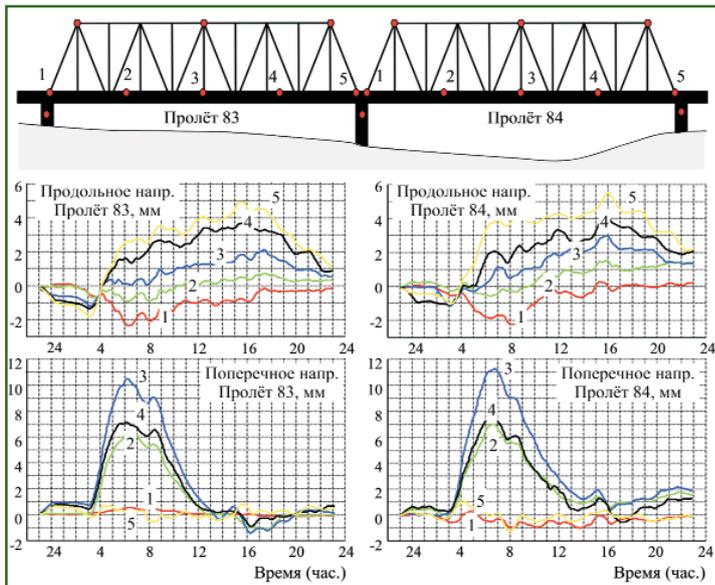


Рис. 4
Графики суточных деформаций на нижнем ярусе деформационных точек в продольном и поперечном направлениях

ординаты и наклоны) деформаций несущих конструкций. Для получения обобщенной модели деформаций были дополнительно измерены параметры возможного воздействия на несущие конструкции, в частности, температура воздуха. В процессе дальнейшей обработки контролировалось не превышение геометрических параметров критических величин, а изменение поведения несущих конструкций при колебании их температуры.

Если не учитывать разработку и изготовление измерительных приборов, то описанные непрерывные измерения особой сложностью не отличаются. Однако обработка полученных данных является достаточно сложной задачей. Представленные результаты измерений на мостовом переходе были обработаны по алгоритму и программе, разработанными Берлинским университетом прикладных наук [2].

Анализ графиков суточных деформаций на нижнем ярусе деформационных точек в продольном и поперечном направлениях показывает следующее

(рис. 4). Очевидно, что максимальные изменения установлены в точках, расположенных в середине пролетов. Примерно одинаковые деформации в данных точках (около 10 мм в поперечном направлении и 5 мм в продольном направлении) зафиксированы в утренние часы, что соответствует периоду максимального остывания металла.

Смещения, выявленные на опорах, не превышали в течение суток 2 мм, что, с одной стороны, говорит о высокой стабильности оснований моста, а с другой — подтверждает высокое качество измерений.

▼ **Методика частотных измерений**

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. Мировой опыт применения подобных методов контроля доказывает, что повреждения несущих конструкций часто могут быть выявлены уже на начальном этапе, благодаря изменению частотного спектра колебаний. Эти методы позволяют на раннем этапе локализовать такое явление, как появление скрытых трещин в несущих конструкциях. В результате могут быть предприняты своевременные меры для устранения подобных деформаций или предотвращения их дальнейшего развития.

Одной из целей выполненного авторами в 2009 г. проекта была отработка методики высокочастотного мониторинга и пробные измерения для определения характерных параметров колебаний несущих конструкций мостового перехода через р. Юрибей при помощи измерительного комплекса, разработанного в Берлинском университете прикладных наук. Основой данной измерительной системы являются компактные электронные измерители ускорений. Эти датчики, имея сравнительно невысокую стоимость, обладают достаточным для поставленных задач диапазоном измерений амплитуд в $\pm 20 \text{ м/с}^2$ и частотами до 20 Гц. Паспортная точность измерений составляет около 2%. Приборный комплекс позволяет одновре-

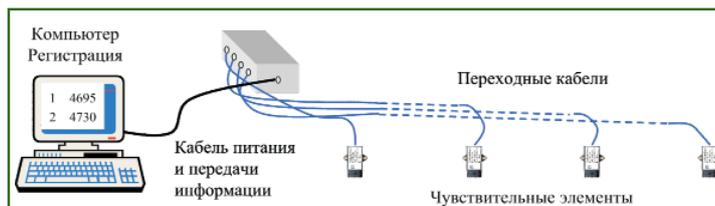


Рис. 5
Схема измерительного комплекса

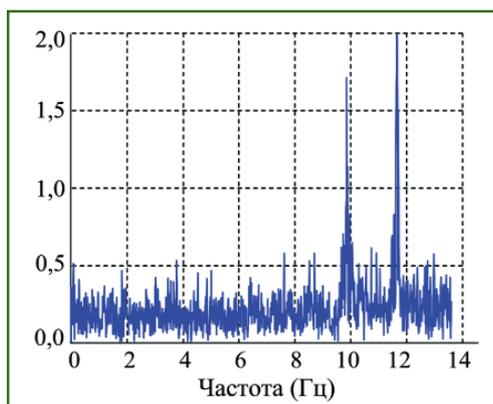


Рис. 6
Спектрограмма одной из характерных точек мостового перехода

менно проводить измерения и регистрацию данных при использовании до 8 закрепленных на несущих конструкциях компактных чувствительных элементов, которые соединяются с полевым компьютером с помощью специальных кабелей (рис. 5).

Для частотных измерений была выбрана русловая часть мостового перехода с длиной двух пролетов около 110 м. Контроль выполнялся на 22 ребрах жесткости вертикальных элементов ферм на обеих сторонах мостового перехода. Продолжительность одного сеанса измерений составляла одну минуту. За это время запоминающее устройство было способно зарегистрировать до 60 000 величин при частоте измерений 1000 Гц.

При последующей обработке данных с помощью методов спектрального анализа определялась амплитудно-частотная характеристика сигнала, и выделялись частоты так называемых собственных колебаний контролируемых конструкций. Таким образом, при использовании этого метода измерений контролируются не амплитуды колебаний, а изменения резонансных частот в различные моменты времени. Любые изменения этих частот во времени свидетельствуют о существенных ме-

ханических изменениях в несущих конструкциях. Обработка измерений на контрольных точках мостового перехода выполнялась по оригинальному алгоритму с помощью программы, подготовленной в Берлинском университете прикладных наук. На всех контрольных точках измерения выполнялись дважды. Результаты повторных определений резонансных частот имели хорошую сходимость друг с другом в пределах нескольких процентов.

Результатом обработки измерений являются так называемые спектрограммы, совмещающие выделенные частоты и соответствующие амплитуды колебаний на характерных точках мостового перехода, отобранных для пробных измерений. Так как объем данной статьи не позволяет включить описание всех результатов измерений, здесь представлен только один график такого рода (рис. 6). На нем отчетливо видны резонансные частоты в форме отдельных пиков, возвышающихся над общим шумовым фоном. Установленные колебания вызывались ветровой нагрузкой, так как передвижение транспортных средств по мостовому переходу к моменту измерений было не регулярным и не поддавалось планированию. Частотные измерения планируется повторить при последующих циклах деформационных наблюдений на мостовом переходе в 2010 г. После обработки этих данных можно будет сделать окончательный вывод о целесообразности применения метода и измерительного комплекса для решения поставленных задач.

▼ Полученные результаты и перспективы их использования

Таким образом, следует отметить, что теоретические вычисления периодических деформаций в результате различных внешних воздействий, таких как изменение температуры окру-

жающей среды, ветровая или транспортная нагрузки, для существующих сооружений даже при известных величинах нагрузки не всегда надежны. Причиной этому является состояние строительных материалов, параметры которых в процессе эксплуатации изменяются, как правило, неравномерно. Расчетные модели деформаций могут быть успешно проконтролированы на основе описанных методов измерений, что позволит повысить надежность инженерных сооружений.

Результаты выполненных работ и их точность свидетельствуют о возможности применения метода и измерительного комплекса для решения поставленных задач. Выполненные в 2009 г. измерения на мостовом переходе необходимо повторить, после чего можно будет сделать вывод о состоянии отдельных опор и пролетных строений. Стабильность выявленных параметров будет свидетельствовать об отсутствии критических изменений в несущих конструкциях. На основании накопленного опыта авторы убеждены, что описанные методы мониторинга могут успешно применяться и для других уникальных сооружений в условиях Крайнего Севера.

▼ Список литературы

1. Википедия [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki>.
2. Резник Б.Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений // Геопрофи. — 2008. — № 4. — С. 4–11.

RESUME

The authors substantiate the modern concept of the geodetic monitoring of complex engineering constructions. The technique and results of the geodetic and frequency measurements made in 2009 within the framework of monitoring the railway bridge on the Yuribei river are given.