

НЕПРЕРЫВНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СООРУЖЕНИЙ

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. 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 эксплуати-

руемых инженерных сооружений и принятие своевременных профилактических мер, обеспечивающих их нормальную работу. В геодезической литературе в качестве понятия «анализ деформационных измерений» обычно понимается уравнивание специальных геодезических деформационных сетей. Опорные пункты, расположенные вне зоны возможных деформаций, обеспечивают при решении этих задач сравнение результатов измерений двух или более циклов измерений (эпох) друг с другом и выявление значимых геометрических изменений между ними. Выбор времени отдельных

циклов измерений зависит от вида сооружения, величины и скорости изменения деформаций, а также других факторов.

В настоящее время не только специальные приборы (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. Они обеспечивают непрерывные измерения перемещений (деформаций) строительных конструкций, вызванных воздействием внешних факторов (тем-

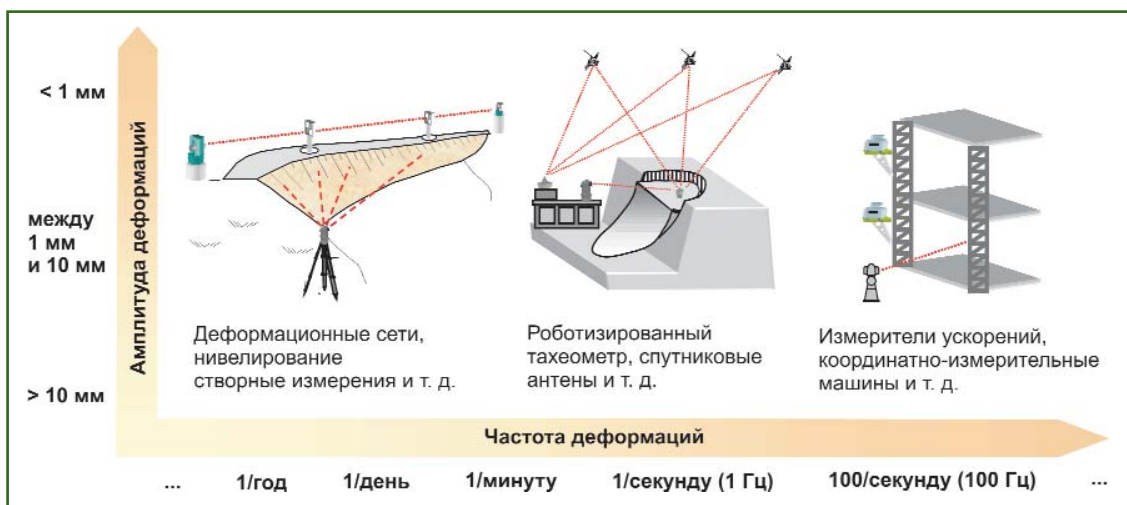
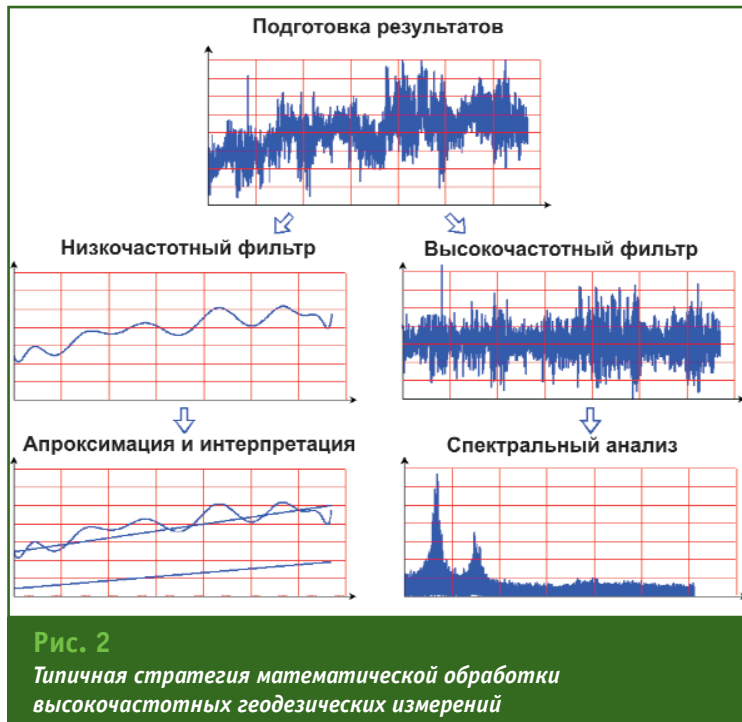


Рис. 1

Выбор методики измерений в зависимости от амплитуды и частоты деформации



пературы окружающей среды, ветровой нагрузки, механических воздействий движущихся транспортных средств и т. п.). Благодаря быстрому развитию измерительной и компьютерной техники в последние годы такие методы измерений приобретают все большее значение.

При выборе метода измерений должны быть учтены необходимая точность и периодичность (частота) измерений (рис. 1). Периодичность измерений должна не менее чем в два раза превышать наибольшую частоту изменения контролируемых деформаций. Таким образом, с помощью существующих геодезических приборов в настоящее время можно контролировать деформационные процессы, протекающие с частотами до 5 Гц. Если необходима большая частота наблюдений, могут быть применены различные измерители ускорений, которыми, однако, в отличие от геодезических приборов, могут быть определены только относительные перемещения (колебания) контролируемых элементов. Геодезические приборы обеспечивают точность измерений около 1 мм. Значительное увеличение точно-

сти до 1 мкм могут обеспечить так называемые координатно-измерительные машины. Наряду с высокой стоимостью, существенным недостатком этих приборов является сравнительно короткий диапазон измеряемых длин (до нескольких десятков метров). Так как наилучший контроль результатов обеспечивают параллельные и независимые измерения, эти методы целесообразно применять совместно.

Если не учитывать разработку и изготовление измерительных приборов, то сами измерения деформаций геодезическими методами особой сложностью не отличаются. Однако обработка полученных данных, состоящих нередко из сотен тысяч отдельных координат или других величин, становится достаточно сложной задачей, требующей не только инженерных, но и обширных математических знаний. Можно выделить следующие основные этапы такой обработки (рис. 2).

Подготовка цифрового ряда наблюдений для математического анализа. На этом этапе особое значение получает поиск резких скачков и разрывов в цепочке измерений, которые часто

связаны с движениями в механических креплениях приборов или прерыванием оптических сигналов между ними. Такие изменения трудно обнаружить на графических изображениях цифрового ряда из-за его длины, и они могут значительно исказить результаты последующего анализа полученных данных. Накопленный опыт показал, что особенно успешно подобные задачи могут быть решены при помощи дискретного вейвлет-преобразования [1].

Восстановление одинакового временного интервала между наблюдениями. Для того, чтобы заполнить образовавшиеся разрывы в данных (например, из-за замены источника питания), необходима интерполяция данных. Эта задача может быть решена с помощью какой-либо приближенной функции, например, состоящей из отдельных прямолинейных отрезков и проходящей через все имеющиеся точки измерений. Как правило, одновременно может быть реализован или восстановлен одинаковый временной интервал между отдельными измерениями, который требуется для большинства методов корреляционного и спектрального анализа.

Выделение и обработка низкочастотного сигнала. Эта процедура осуществляется с помощью математического фильтра. Для анализа и экстраполяции (прогнозирования) выделенного низкочастотного сигнала, освобожденного от искажающего его шума, требуется усредненная аппроксимированная функция [2]. В тех случаях, когда реальные физические закономерности процессов неизвестны, как правило, применяются обычные полиномы. Интерпретация контролируемых деформаций возможна, благодаря последующему совместно корреляционному или регрессионному анализу различных, в том числе и негеометрических данных (например, температуры).

Выделение и обработка высокочастотного сигнала. Высокочастотные колебания строительных конструкций могут быть выделены из результатов измерений вычитанием низкочастотного сигнала. При помощи спектрального анализа (разложение в ряд Фурье) в дальнейшем может быть определена амплитудно-частотная характеристика сигнала и выделены частоты так называемых собственных колебаний контролируемых конструкций.

Рассмотрим подробней опыт организации непрерывных измерений деформаций и обработки полученных результатов на примере двух проектов, выполненных сотрудниками Берлинского университета прикладных наук (TFH Berlin).

▼ **Наблюдения за конструктивными элементами на водном перекрестке Магдебурга**

Канал Гановер — Магдебург — Берлин играет важную роль в судоходном сообщении Германии. В месте пересечения этого канала с рекой Эльба в 2003 г. был принят в эксплуатацию самый длинный в мире мост этого типа, общей длиной около 918 м. Главная задача геодезического проекта, выполненного

в 2007 г. силами Берлинского университета прикладных наук, состояла в проведении ежегодной инспекции, обработке результатов и их передаче ответственной за эксплуатацию организации. Организация долгосрочных измерений для исследования деформаций сооружения соответствовала принятой практике и состояла из высокоточного нивелирования и линейно-угловых измерений обширной сети специальных пунктов, закрепленных на опорах моста и вне зоны возможных деформаций. Выполненные высотные измерения верхнего строения мостового перехода показали его большие деформации в течение одного дня, поэтому запланированное сравнение изменений в течение года потеряло всякий смысл. Было принято решение дополнительно к перечисленным выше измерениям провести непрерывные многочасовые наблюдения деформаций для некоторых характерных участков мостового перехода.

Так как наилучший контроль результатов обеспечивается применением различных и независимых измерений, непрерывные измерения деформаций выполнялись параллельно электронным тахеометром и высоко-

точным электронным измерителем наклонов. Оба метода обеспечивают частоту измерений около 8 Гц (восемь измерений в одну секунду) и основаны на принципиально различных принципах.

Для измерений использовались роботизированный электронный тахеометр Leica TCRP 1202 и электронный измеритель наклонов Leica Nivel 20 (рис. 3). Роботизированный тахеометр по заданной программе и с заданной частотой в автоматическом режиме находит положение отражателя, установленного на контрольном пункте, измеряет расстояние, горизонтальный и вертикальный углы. На основе этих данных можно вычислить пространственные координаты отражателя с точностью до 1 мм. Электронный измеритель наклонов работает по принципу электронного уровня и способен с заданной частотой автоматически регистрировать значения углов наклона в двух взаимноперпендикулярных направлениях с точностью около 1–2 мкм/м. Подобные геодезические измерения позволяют получить только геометрические параметры (координаты и наклоны) деформации несущих конструкций. При их интерпретации прогноз

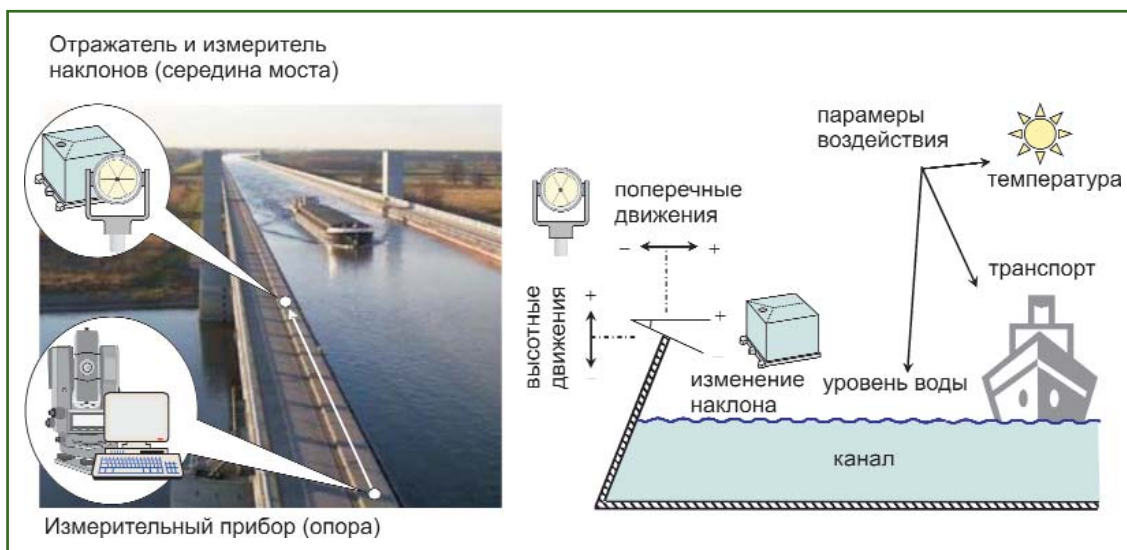


Рис. 3

Непрерывные деформационные измерения конструктивных элементов моста на водном перекрестке Магдебурга

дальнейшего развития возможен только в том случае, если остальные параметры (уровень воды в канале, проходящего по мостовому переходу, температура и т. д.) остаются неизменными при всех циклах наблюдений. Для получения обобщенной модели деформаций должны быть дополнительно измерены параметры возможного воздействия на несущие конструкции, такие как температура воздуха, время прохождения судов по каналу, уровень воды в нем и т. д.

Так как объем данной статьи не позволяет включить описание всех результатов измерений, здесь представлен только анализ взаимного влияния различных параметров при их обработке. На рис. 4 изображены типичные деформации в поперечном направлении в течение одного дня в интервале времени с 9.30 до 14.00, полученные по результатам обработки с применением низкочастотного фильтра. Для того, чтобы математически проанализировать влияние проходящих кораблей на несущие конструкции моста на основе измерений был создан искусственный сигнал из отдельных импульсов, соответствующих времени прохождения судовых средств. Между сигналами наклонов и вертикальных движений контролируемых точек, полученными по результатам большого количества измерений, были установлены коэффициенты корреляции около 0,83. Это доказывает, что в обоих случаях были измерены одни и те же процессы, и что на основе полученных в результате измерений наклонов конструкций могут быть вычислены их горизонтальные перемещения и наоборот. Значимые коэффициенты корреляции были также установлены между изменениями температуры и деформациями верхнего строения моста, амплитудами высокочастотных колебаний несущих конструкций на определенных частотах и прохождением судов по каналу.

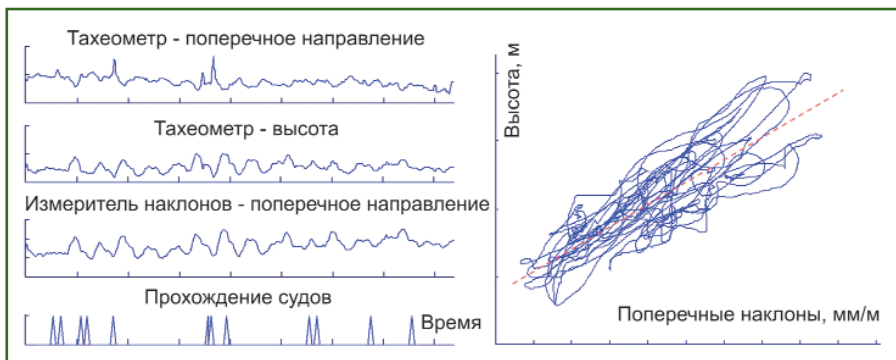


Рис. 4

Результаты деформационных измерений конструктивных элементов моста на водном перекрестке Магдебурга

Наблюдения на мостовом переходе Dammbuecke в Берлине

В 2005–2007 гг. силами Берлинского университета прикладных наук под руководством автора статьи были выполнены непрерывные деформационные измерения на мостовом переходе Dammbuecke в Берлине. Этот современный бетонный мостовой переход, общей длиной 69,80 м и шириной около 18,50 м, построенный в 1984–1986 гг., имеет по две полосы для автомобильного и трамвайного движения. Также как и в первом описанном проекте, главной задачей измерений являлось проведение очередной инспекции, оценка устойчивости этого инженерного сооружения и принятие своевременных профилактических мер, обеспечивающих его нормальную работу. Выполненные измерения включали высокоточное нивелирование и линейно-угловые измерения обширной сети специальных пунктов, установленных на опорах моста и вне зоны возможных деформаций. Особенностью мостового перехода является значительная кривизна подъездных путей как в плане, так и в профиле. По этой причине, особенно во время прохождения трамваев с общим весом около 18 т и других тяжелых транспортных средств, возникают значительные колебания несущих конструкций мостового перехода. Поскольку

такие колебания при определенных условиях способны значительно ухудшить несущую способность инженерного сооружения, было принято решение дополнительно к названным классическим измерениям применить многочасовые непрерывные высокочастотные измерения при помощи роботизированного электронного тахеометра и измерителя наклонов на характерных элементах мостового перехода. Во время измерений отражатель и электронный измеритель наклонов Leica Nivel 20 были закреплены в центральной части мостового перехода. Электронный тахеометр Leica TCRP 1202 располагался вне зоны деформаций, на расстоянии около 70 м от отражателя, таким образом, чтобы оптический луч был близок к горизонтальной плоскости и проходил параллельно оси моста. Такая организация угловых измерений позволяла без каких-либо преобразований вычислить вертикальные и поперечные движения отражателя и соответствующие деформации верхнего строения моста и избежать искажений из-за менее точных линейных измерений.

Не останавливаясь на обработке всех результатов измерений, представим только один путь анализа взаимного влияния различных параметров. На рис. 5 изображены типичные результаты измерений (тахеометр и измеритель наклонов) на протяжении примерно пяти часов, ин-

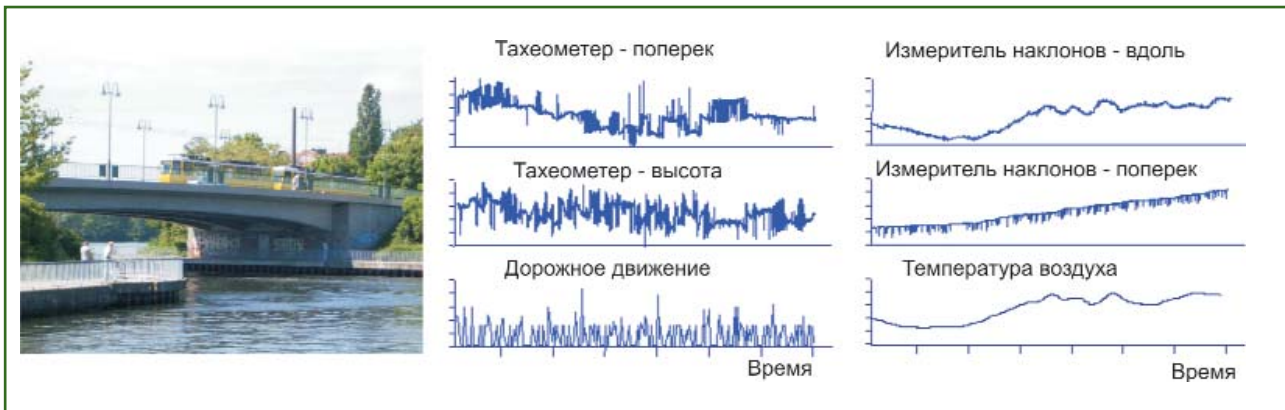


Рис. 5

Непрерывные деформационные измерения на мостовом переходе Dammbuecke (Берлин)

терполированные с одинаковой частотой 10 Гц без применения какого-либо математического фильтра. На основании этих результатов по методу наименьших квадратов были вычислены коэффициенты аппроксимированного низкочастотного сигнала. С целью определения возможного влияния транспорта и температуры окружающей среды на несущие конструкции с точностью до одной секунды было дополнительно зарегистрировано время прохождения отдельных тяжелых транспортных средств по мосту в районе контрольных пунктов и температура воздуха.

Наиболее очевидным путем для того, чтобы определить на каких частотах дорожное движение вызывает колебания несущих конструкций, является разбиение сигналов на отдельные короткие участки равной длины («окна») с последующим приме-

нением алгоритма быстрого преобразования Фурье к каждому из них. Этот прием широко известен в практике анализа сигналов как STFFT (Short Time Fast Fourier Transform). Длина «окон» должна быть достаточно большой, чтобы в них на основании разложения в ряд Фурье можно было вычислить с достаточно большим разрешением амплитудно-частотную характеристику сигнала, и в то же время достаточно короткой, чтобы эти параметры можно было привести к какому-либо конкретному времени. Оптимальные результаты в рассматриваемом случае были получены при «окнах» из 512 измеренных величин (51,2 с). На графике внизу слева, на рис. 6, представлены усредненные на ширину «окна» результаты измерений, вызванные движением транспортных средств по мосту, а на графике вверху — вычис-

ленные амплитуды колебаний несущих конструкций в поперечном направлении (измеритель наклонов) на различных частотах. Математическая зависимость между этими сигналами описывается коэффициентами корреляции, значения которых между средними амплитудами колебаний и интенсивностью транспортного движения, полученные на основе большого количества данных, составили около 0,7. Это доказывает, что именно движение транспортных средств по мостовому переходу является главной причиной его колебаний на контролируемых частотах. Представленные результаты позволяют также установить, какие именно частоты определяют диапазон собственных колебаний контролируемых конструкций. Так в рассматриваемом примере установлена особенно тесная корреляционная связь между обоими сигналами на частотах около 3 Гц (график справа на рис. 6).

Опыт наблюдений за деформациями конструкций инженерных сооружений позволяет сделать следующие выводы.

Изменение температуры, а также неодинаковый солнечный нагрев пролетного строения может значительно изменять форму несущих конструкций, особенно в середине пролета. Поэтому при сравнении результатов деформационных измерений при различных температурах не-

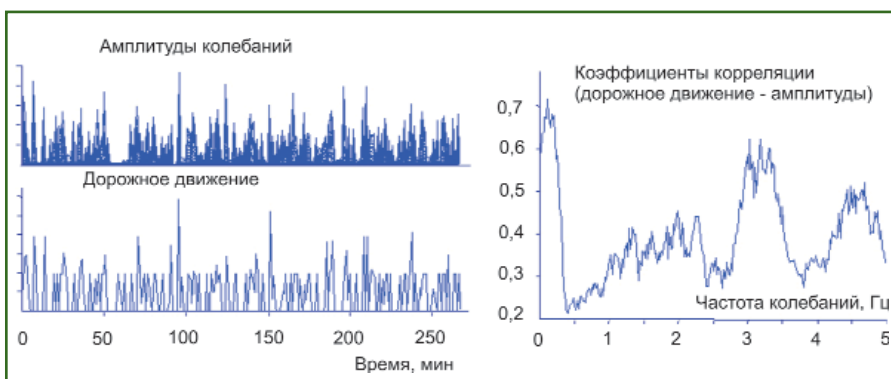


Рис. 6

Спектральный анализ колебаний несущих конструкций (мост Dammbuecke, Берлин)

обходимо вводить поправки в полученные координаты, чтобы привести результаты каждого цикла наблюдений к температуре первого цикла измерений. Для математического анализа таких деформаций должен использоваться низкочастотный фильтр. Если изменения температуры вызывают сравнительно медленные изменения геометрии несущих конструкций, то движение транспортных средств активизирует их быстрые колебательные движения. Эти колебания могут быть успешно выделены при помощи высокочастотного фильтра и дальнейшего спектрального анализа.

В то время как несущие конструкции современных строительных сооружений в соответствии с появлением новых материалов и изменяющимся вкусом становятся все более изящными, нагрузки на них возрастают с каждым годом. Чем легче становятся строительные сооружения, тем сильнее

они деформируются в результате различных внешних воздействий, таких как изменение температуры окружающей среды, ветровая или транспортная нагрузки. Теоретические вычисления таких, как правило, периодических, деформаций для существующих сооружений, даже при известных величинах нагрузки, ненадежны, так как параметры строительных материалов в процессе эксплуатации изменяются, как правило, неравномерно. На основе описанных методов измерений и обработки расчетные модели деформаций могут быть успешно проконтролированы, что позволит повысить надежность их прогнозирования. Практическая реализация подобных задач требует интенсивной совместной работы различных специалистов и, в первую очередь, в области геодезии и строительства.

▼ Список литературы

1. Resnik B. Analyse von automatisierten Deformationsmessungen

mit Wavelet-Transformation. — VDVmagazin 3/2007. — S. 200–203.

2. Resnik B. Approximation von dynamischen Bauwerksdeformationen anhand der kontinuierlichen Messung mit geodatischen Sensoren. — VDVmagazin 5/2007. — S. 360–363.

RESUME

The below given conclusions have been drawn based on the experience of conducting continuous geodetic measurements of the building structural deformations under this article's author supervision. While processing the data measured it is necessary to consider not only geometrical parameters but exogenous factors varying in-between the observation cycles including ambient temperature as well as wind and mechanical loads. Additionally for the further measurement interpreting it is recommended to process separately low frequency and high frequency components using certain elements of the correlation, regression and spectral analysis.

Инженерно-геодезические изыскания

Геодезическое сопровождение строительства

Разработка систем дистанционного мониторинга

Поставка оборудования

тел. (495) 955-2857

тел./факс (495) 580-5816

info@geometer-center.ru

www.geometer-center.ru

