



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТНОЙ И ГРАЖДАНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А.А. Белый^{*1}



¹ООО «К2 Инжиниринг» (Москва, Россия)

*Корреспондент автор: andbeliy@mail.ru

Аннотация. Мониторинг – это современный инструмент по управлению техническим состоянием объектов транспортной и промышленно-гражданской инфраструктуры. В составе мониторинга присутствуют различные подсистемы, имеющие под собой разные физические основы. Целью статьи является описание данных систем, с кратким описанием природы каждой из них. В качестве методологии исследования использовались существующие базисные подходы. Основным результатом исследования является возможность адекватного применения различных подсистем в совокупности, интегрально. Что с практической точки зрения дает максимальный технико-экономический эффект.

Ключевые слова: мониторинг, техническое состояние, объекты транспортной инфраструктуры, надежность, эффект

Введение

В настоящее время системы мониторинга являются наиболее адекватным и точным инструментом по диагностике объектов гражданского и транспортного строительства как во время их возведения, так и особенно в период последующей эксплуатации [1, 3, 4, 6, 9, 10]. Эта тенденция наблюдается параллельно с новыми современными подходами глобального информационного моделирования и обследования искусственных сооружений [11]. Различными примерами применения систем мониторинга являются транспортные объекты: мосты [8, 9, 12, 13, 15], тоннели [16, 17], набережные, дамбы [18] и гидротехнические сооружения, а также отдельные элементы объектов транспортной инфраструктуры [19, 20, 21], но основной сферой применения систем мониторинга являются мостовые конструкции [5, 8, 9, 12, 13, 15, 22, 23]. По всей видимости это связано со сложными условиями их эксплуатации, что, впоследствии, напрямую влияет на степень сложности работ по их ремонту и содержанию: зачастую мостовые сооружения расположены через большие реки, заливы, искусственные преграды.

Кроме того, данная тема (системы мониторинга с классификацией на типы и комбинации) до сих пор не имеет всестороннего анализа и результатов. Несмотря на ряд диссертаций за последние годы [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31], вопрос координации и одновременной работы подсистем мониторинга до сих пор открыт для исследований и требует некоторого анализа.

В этой связи основная цель настоящей статьи – теоретическая иллюстрация совместной работы различных подсистем мониторинга конструкций, делающих исследования в области управления техническим состоянием конструкций гораздо простыми и, что более важно, точными. С этой целью даны описания некоторых подсистем, с их возможностями, преимуществами и недостатками.

Методология

Мониторинг [2, 7, 16] – это процесс постоянного контроля за текущем состоянием любого объекта с накоплением и оценкой собираемой информации, контроля изменения технического состояния во времени и взаимодействия объекта контроля с природными и техногенными факторами.

Как указано в работе [9], стремительный рост числа большепролетных и высотных искусственных сооружений по всему миру очевидно привел к ускорению развития и внедрения систем инструментального мониторинга.

Основной метод исследования состоит в кратком описании подсистем мониторинга с реальными примерами и иллюстрацией основных принципов работы и анализа.

Вкратце, данные (*англ.* data, D), необходимые для заказчика, могут быть получены от подсистем мониторинга, что может описано следующим образом:

$$D = \begin{Bmatrix} SDC & INCL \\ ACC & DISP \end{Bmatrix} \quad (1)$$

где

SDC – Напряженно-деформированное состояние (*англ.* Stressed-Deformed Condition) (напряжения и деформации);

$INCL$ – Наклоны (*англ.* Inclines) (углы поворота);

ACC – Ускорения (*англ.* Acceleration) (ускорения сами по себе и их производные, такие как вибрации и частотные характеристики);

$DISP$ – Перемещения (*англ.* Displacement) (абсолютные и относительные).

Напряженно-деформированное состояние (SDC) обычно контролируется тензометрическим способом. Для его реализации разработаны специальные приборы – тензометры. Они измеряют деформацию в определенной точке (зоне) элемента конструкции, и затем, используя закон Гука, определяют напряжения. Деформации, измеряемые на отрезке, называемом *базой* S , при работе в упругой стадии характеризуются малыми значениями. Тензометрами измеряют абсолютное удлинение (укорочение) ΔS и по ним определяют среднюю относительную деформацию:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} \quad (2)$$

Для того чтобы средняя относительная деформация точнее отражала истинную, база S должна быть по возможности меньшей.

При линейном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерить ΔS – на базе, расположенной по направлению действующего усилия. По полученному значению ε и известному модулю упругости E вычисляют напряжение:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (3)$$

В случае плоского напряженного состояния в данной точке измеряют деформации в двух или трех направлениях.

Датчики располагаются вдоль главных напряжений σ_1 и σ_2 либо (если направления главных напряжений неизвестны) один датчик может быть установлен произвольно, а два других – под углами 45° и 90° или 60° и 120° к нему. В первом случае (известны направления главных напряжений) σ_1 и σ_2 определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1), \\ \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где

μ – коэффициент Пуассона.

Во втором случае вычисления немного сложнее, но определяемы. Во избежание чрезмерности объема статьи не станем размещать соответствующие формулы.

Старые тензометры, которые использовались при испытаниях и обследованиях мостовых сооружений до 1990-х г.г. (в некоторых исключительных случаях используемые и сейчас), измеряли изменение длины базы ΔS . Современные тензорезисторы, широко распространенные в наши дни, фиксируют относительное удлинение ε (см. формулу 3). Эти датчики дешевле и легче в установке и пуско-наладке по сравнению с «классическими» тензометрами, но имеют очень важную характеристику – коэффициент тензочувствительности η . Принцип действия тензорезисторов основан на изменении омического сопротивления R проводников и полупроводников при их деформации. Он может быть выражен следующим образом:

$$\eta = \frac{\Delta R \cdot R}{\varepsilon} \quad (5)$$

где

R – номинальное сопротивление тензорезистора, определяемое по (6);

ΔR – изменение сопротивления тензорезистора.

$$R = \frac{\rho l}{f} \quad (6)$$

где

ρ – удельное сопротивление материала тензорезистора;

l – начальная длина деформируемого участка проводника;

f – площадь сечения проводника.

В качестве резюме по этой подсистеме отметим тот факт, что напряжения могут быть измерены только ей. Другими словами, только средствами инструментального мониторинга возможно фиксировать деформации и напряжения, геодезическими методами сделать это нереально. Некоторые исследователи даже выделяют «деформационный мониторинг» в самостоятельную форму [15], однако мы бы не стали придерживаться этого, оставив его «внутри» инструментального мониторинга.

Подсистема контроля ускорений предоставляет динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений и частотных картин колебаний. Они (параметры) интегрально содержат данные о жесткостях, массах сооружения и внешних воздействиях.

Результаты измерений при «динамическом мониторинге» позволяют выявить скрытые изменения прочностных свойств конструкций [15]. Таким образом, в задачи динамического мониторинга входит следующее:

- определение доминирующих частот свободных колебаний;
- оценка влияния сейсмической активности на динамическую работу сооружения;
- установление уровня влияния транспортных нагрузок на динамические характеристики;
- анализ частот с целью оценки и прогноза изменения технического состояния.

Необходимость решения поставленных в рамках динамического мониторинга задач открывает широкое поле как для исследований самих конструкций с оценкой развития в них скрытых повреждений, так и с точки зрения методик, инструментария и постановки задач мониторинга. И в связи с этим следует отметить, что одной из основных характеристик любой конструкции являются параметры собственных колебаний, представленные в виде набора частот и соответствующих им форм колебаний.

Из динамики сооружений известно уравнение:

$$(C - \lambda E)\vec{v} = 0 \quad (7)$$

где

$C=AM$; A – матрица податливостей системы с n -степенями свободы;

M – диагональная матрица масс;

E – единичная диагональная матрица;

λ – собственное значение матрицы C ;

$\vec{v}$ – собственный вектор матрицы C .

При мониторинге частот собственных колебаний предметом измерений являются составляющие λ и $\vec{v}$, содержащиеся в спектральной плотности реакции моста на внешние воздействия. Собственные колебания вызываются рядом начальных условий, связанных с приданием конструкции начального перемещения и (или) начальной скорости, либо вызываются изменяющейся во времени нагрузкой с постоянным спектром воздействия.

На придании начальных перемещений основан метод «малых воздействий» [15], когда, например, пролетное строение моста «раскачивается» от прыжка на нем одного или нескольких человек, затем претерпевает затухающие колебания с частотами, близкими к собственным. Однако его применение в условиях непрерывного мониторинга имеет определенные ограничения, связанные в первую очередь с постоянным движением по мосту автотранспорта.

Затруднено при непрерывном автоматизированном мониторинге и применение активной вибродиагностики путем приложения гармонической вибрационной нагрузки, т. к. в этом случае производят разовые диагностические процедуры, а не постоянный контроль и модальный анализ.

Более перспективный способ вызова собственных колебаний конструкции основан на внешнем воздействии, обладающем постоянным частотным спектром $S(\omega)$, так называемом белом шуме [15]. В этом случае непрерывный мониторинг, во-первых, обеспечит репрезентативную выборку реализации частот собственных колебаний, а во-вторых, несмотря на малую чувствительность низшей частоты колебаний к дефектам на сооружении, позволит выявлять тенденции в изменении состояния. В отличие от методов «малых воздействий», проезжающий автотранспорт продуцирует колебания конструкций в достаточно широком диапазоне частот, соответствующих не только низшей, но и следующим за ней формам деформаций конструкции.

Подсистема контроля наклонов/углов поворота возможно самая простая технически среди других, так она требует лишь базовых геометрических и физических познаний для проектирования, выбора и расстановки специализированных датчиков.

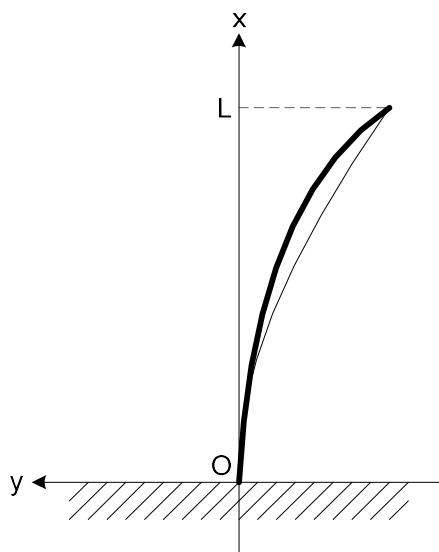


Рис. 1

Как известно, инклинометры (или наклонометры) измеряют угол наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли – рис. 1. В настоящее время наибольшее применение нашли двухкоординатные инклинометры для возможности проведения измерений в двух направлениях (как правило, вдоль и поперек оси сооружения).

Вкратце работа инклинометров описывается в работе [13]. Их основой являются древние наблюдения, связанные с уровнем воды.

Основным средством геодезического обеспечения строительства в то далекое время была вода. Простота и гениальность такой технологии при выравнивании основания фундамента будущего сооружения заключалась в следующей операции. Котлован заполнялся водой, а затем проводились измерения расстояния от дна котлована до поверхности воды, т. е. сравнивалось положение поверхности котлована с горизонтальной поверхностью воды. Это позволяло выравнивать основание на значительной территории с точностью в несколько сантиметров. Чтобы не зависеть от погодных условий и использовать меньшее количество жидкости, ее залили в стеклянную ампулу и герметично закрыли (запаяли). Так была создана пузырьковая камера, которая до настоящего времени является идеальным средством, задающим горизонтальную поверхность, не только в строительных уровнях, но и практически во всех современных геодезических средствах измерения (нивелирах, теодолитах, электронных тахеометрах, наземных лазерных сканерах и т. д.).

Постоянное увеличение точности геодезических измерений с одновременным снижением их трудоемкости потребовало поиска новых технических решений, которые могли бы заменить традиционные маятниковые компенсаторы, обеспечивавшие коррекцию наклона прибора, в небольшом, но определенном диапазоне (несколько сотен угловых секунд).

Рассмотрим принцип работы современного инклинометра более подробно [13] – см. рис. 2.

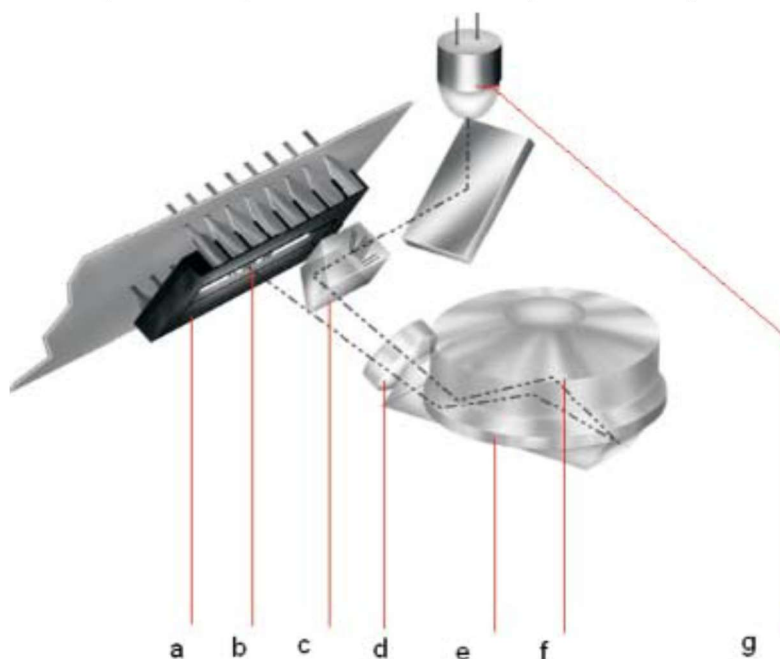


Рис. 2. Принцип работы современного инклинометра

Датчиком угла наклона данного устройства является капсула с жидкостью — жидкостный уровень (f). Поскольку поверхность жидкости в ампуле остается в горизонтальном положении независимо от наклона уровня, то величина угла наклона устройства однозначно определяется по углу между поверхностью жидкости и основанием уровня.

Измерение угла наклона происходит следующим образом. Световой поток, излучаемый полупроводниковым диодным лазером (g), проходя через отклоняющую призму (c), фокусирующую систему линз (d) и проецирующую призму (e), попадает в капсулу с жидкостью. Отражаясь от поверхности капсулы и жидкости, световой поток через фокусирующую оптическую

систему попадает на ПЗС матрицу, с помощью которой угловые перемещения регистрируются и преобразуются в цифровой выходной сигнал.

Полученная информация может поступать на устройство регистрации или персональный компьютер через специальный разъем, обрабатываться, отображаться на экране компьютера в графическом виде и записываться в файл.

При использовании инклинометров у них есть одно существенное ограничение в области применения. Когда инклинометр расположен в зоне, с одинаковыми углами поворота с двух сторон. Например, это середина разрезной балки. Даже при поворотах на большую величину в опорных зонах датчик не наклонится. Поэтому располагать инклинометры следует в точках пересечения гармоник ряда Фурье с осью стержня [14], что для большепролетных сооружений определяется по формуле:

$$y(x) = y_0 + \sum_{i=1}^n \left(y_{si} \sin \frac{\pi i x}{L} + y_{ci} \cos \frac{\pi i x}{L} \right) \quad (8)$$

Подсистема перемещений контролируется методами геодезического мониторинга (подсистема спутникового позиционирования ГНСС).

В основе спутниковой системы мониторинга деформаций лежит принцип дифференциального (относительного) спутникового позиционирования с помощью сигналов ГНСС.

Спутниковые приемники принимают радиосигналы от спутников навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. После первичной обработки сигнала приемники передают «сырые» спутниковые данные на сервер для дальнейшей обработки. Данные спутниковых приемников содержат эфемеридную, навигационную информацию и фазовые отчеты.

Обработка спутниковой информации осуществляется с помощью программного обеспечения на компьютере (сервере) с помощью алгоритмов разрешения фазовой неоднозначности спутниковых ГНСС измерений, решения навигационной задачи и получения точного местоположения антенны приемников в дифференциальном режиме кинематического позиционирования – см. рис. 3.

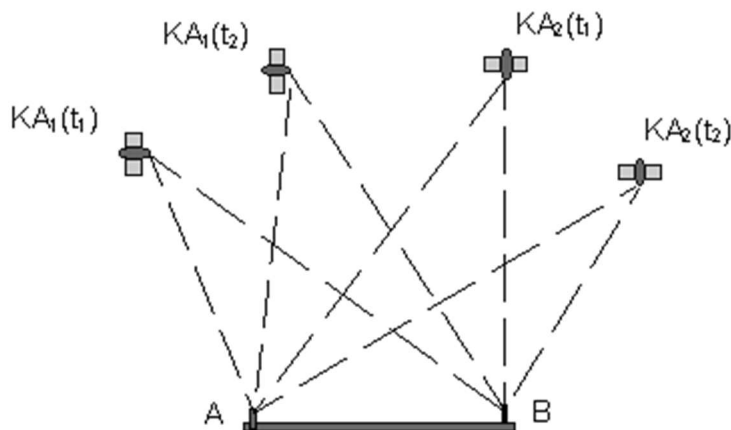


Рис. 3. Дифференциальный способ определения местоположения станций мониторинга

Спутниковые приемники измеряют фазу несущих сигналов ГЛОНАСС/GPS, по которым вычисляются дальности до спутников в каждый момент времени по разностям фаз трех типов: простые, двойные и строенные. Измерения выполняются, когда спутниковые приемники базовой станции и станции мониторинга принимают сигналы более четырех навигационных спутников.

Геометрические дальности до спутников вычисляются методом разрешения фазовой неоднозначности OTF (On-the-fly - разрешение неоднозначности «на лету», используемое к быстро смещаемым точкам) или Quasy-Static (квази-статика, когда предварительно известны координаты точек и их смещение медленное).

После того как будут найдены геометрические дальности до спутников, методом пространственной линейной засечки определяется пространственный вектор (приращение координат) между спутниковыми антеннами базовой станции и станции мониторинга:

$$D = (XB - XA, YB - YA, ZB - ZA)T \quad (8)$$

где,

XA, YA, ZA – значения координат точки мониторинга;

XB, YB, ZB – значения координат базовой станции.

Базовая станция должна иметь точные координаты, чтобы по измеренным приращениям можно было бы вычислить координаты точки мониторинга.

Результатом обработки являются точные пространственные координаты антенны приемников, установленных на критических точках объекта мониторинга, которые сравниваются с проектно-расчетными. Разница значений текущих и заданных проектных координат (пространственные смещения) выводится в графическом виде и сохраняется в цифровом для последующего анализа.

После того как определен вектор между спутниковой антенной базовой станции и станции мониторинга, а затем вычислены точные координаты точки мониторинга, они сравниваются с заданными проектными значениями и вычисляются разности на момент времени, равный эпохе наблюдений. Данные разности являются сутью смещений точки мониторинга:

$$dS = (XA0 - XAt', YA0 - YAt', ZA0 - ZAt')T \quad (9)$$

где,

$XA0, YA0, ZA0$ – заданные проектные значения координат точки мониторинга;

XAt', YAt', ZAt' – текущие определяемые значения координат точки мониторинга на эпоху t' .

Значения смещений точки мониторинга выводятся в виде графика (временного ряда) через интервалы времени соответствующие эпохам спутниковых наблюдений.

Общий принцип работы ГНСС оборудования, примененный на мосту Александра Невского в Санкт-Петербурге, представлен на рисунке 4, а реально установленные элементы – на рисунке 5.

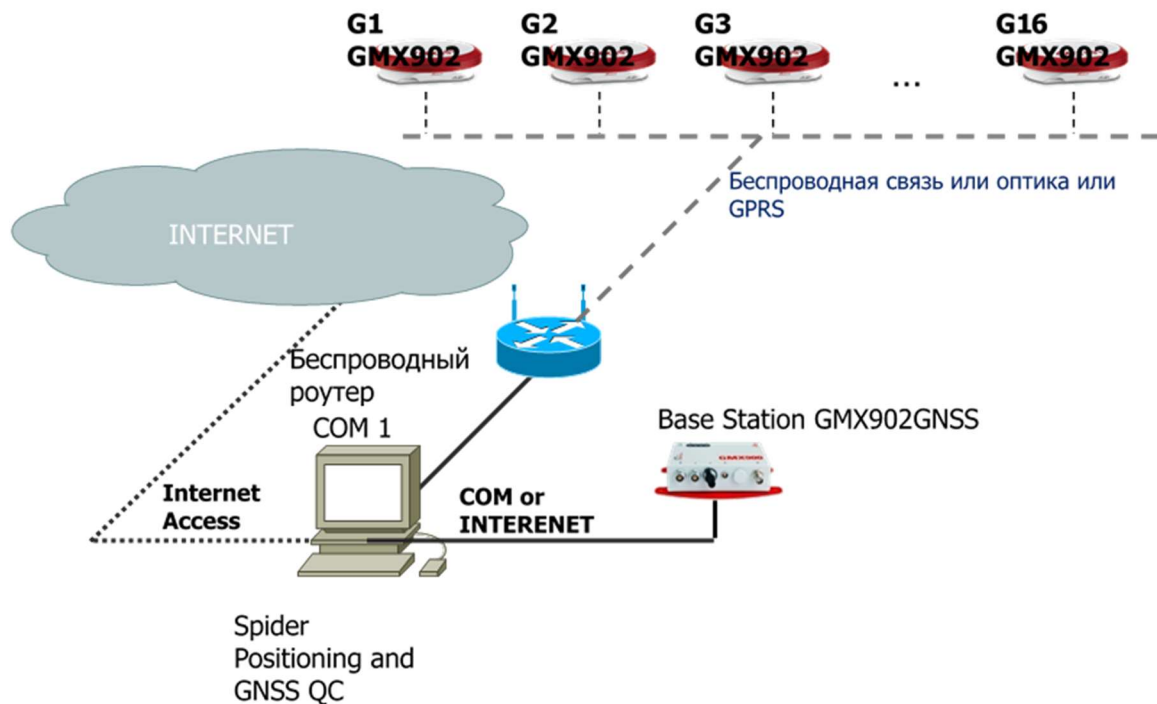


Рис. 4. Принцип работы ГНСС оборудования автоматизированной системы деформационного мониторинга на мосту Александра Невского



Рис. 5. ГНСС оборудование на мосту Александра Невского

Результаты и Обсуждение

В целом, анализируя различные подсистемы мониторинга, следует подчеркнуть тот факт, что методы инструментального мониторинга зачастую используются совместно практически на всех внеклассных и больших мостах. Так, это подтверждается публикациями [1, 8, 9, 13, 15, 23], а также исследованиями авторов настоящей статьи [16, 22]; практически нереально использовать отдельные элементы мониторинга. Только в отдельных случаях можно использовать какой-то один тип датчика (оборудования), а не комплексный набор разнообразных сенсоров.

Авторы вкратце описали теорию каждой из подсистем. Легко обнаружить, что каждая из них имеет абсолютно разную физическую и математическую подоснову. Однако вместе, в совокупности, возможно получить единую *интегральную* систему мониторинга конструкций.

В таблице 1 мы дали оценку преимуществ и недостатков каждой из подсистем. “+++” обозначает высокую точность и возможности подсистемы, “++” – среднюю, “+” – частичное использование, “-” – невозможность контроля параметров подсистемой.

Таблица 1.

Подсистема	SDC	ACC	INCL	DISP
Инструментальный мониторинг	+++	+++	++	+
Геодезический мониторинг	-	++	+++	+++

Заключение

1) Мониторинг конструкций – современный и точный инструмент по управлению техническим состоянием мостовых объектов.

2) Следует выделять две основных подсистемы мониторинга – инструментальный и геодезический, позволяющие контролировать все параметры, требуемые для контроля – data (D).

3) Параметры контроля (Data (D)) состоят из четырех групп характеристик: SDC – напряженно-деформированное состояние (напряжения и деформации); INCL – инклинометрия (углы поворота); ACC – ускорения (сами по себе и производные характеристики, такие как вибрации и частоты); DISP – перемещения (абсолютные и относительные).

4) Некоторые характеристики могут быть получены только определенными (уникальными) датчиками, но в большинстве случаев различные средства инструментального и геодезического мониторинга следует использовать совместно.

5) Одновременное использование различных подсистем мониторинга делает результаты измерения более точными, а анализ и прогноз состояния – более интегральным (комплексным).

Список литературы

1. Sumitro S. Structural Health Monitoring System Applications in Japan / S. Sumitro, M.L. Wang. / In: Ansari F. (eds) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, Dordrecht, 2005. – pp. 495-504. https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.
2. Andersen J. E. Structural health monitoring systems. / J. E. Andersen, M. Fustinoni. Italy: L&S S.r.l. Servizi Grafici, 2006. – 126 p.
3. Rucker W. Guideline for structural health monitoring. Final report / W. Rucker, F. Hille, R. Rohrmann. SAMCO, Berlin, 2006. – 63 p.
4. Li J and Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. *Mech Syst Signal Pr* 2015; 60–61: 124–150.
5. Ana Paula Camargo Larocca, João Olympio De Araújo Neto, Jorge Luiz Alves Trabanco, Augusto César Barros Barbosa, André Luiz Barbosa Nunes Da Cunha, Ricardo Ernesto Schaal. Uso de receptores GPS de 100 HZ na detecção de deflexões verticais milimétricas de pontes de concreto de pequeno porte [The use of GPS at a rate of 100 HZ to detect millimetric vertical deflections of small sized concrete bridges] . *Bol. Ciênc. Geod.*, sec. Artigos, Curitiba, v. 21, no 2, p.290-307, abr-jun, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200017>
6. Lienhart, W., Ehrhart, M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation - Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2015 DOI: 10.12783/SHM2015/58
7. Mustafa Furkan, Qiang Mao, Matteo Mazzetti, John DeVitis, S. Paul Sumitro, Fred Faridazar, A. Emin Aktan, Franklin Moon, Ivan Bartoli. An investigation on wireless sensors for asset management and health monitoring of civil structures. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2016*, edited by Jerome P. Lynch, Proc. of SPIE Vol. 9803, 98033E doi: 10.1117/12.2218908.
8. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique/ *Journal of Sensors Volume 2016* (2016), Article ID 7494817, 14 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>
9. Yang Y. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. // Y. Yang, Q. S. Li, B. W. Yan. *Advances in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 9 (1). p. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
10. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. *Procedia Engineering* 188 (2017) 340 – 347
11. Антонюк А.А., Чижов С.В. Принципы информационного моделирования транспортных сооружений // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №3 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/70TVN317.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
12. Wenzel H. Health monitoring of bridges. / H. Wenzel. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. – 621 p.
13. Ященко А.И. От водяного уровня до высокоточного инклинометра // А.И. Ященко. Журнал "Геопрофи", № 4/2010. – М.: Информационное агентство "ГРОМ", 2010 – С. 17 - 19.
14. Andrei Belyi, German Osadchy, Kirill Dolinskiy. Practical Recommendations for Controlling of Angular Displacements of High-Rise and Large Span Elements of Civil Structures // *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)* – С. 176-183. 10.1109/EWDTS.2018.8524743
15. Яшнов А.Н. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске. // А.Н. Яшнов, Т.М. Баранов. Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017.- №1(60). с. 199-209.

16. Belyi A.A. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example). // A.A. Belyi, E.S. Karapetov, Yu. S. Efimenko. *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. p.145–151. PII:S1877-7058(17)32145-8 DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.024

17. Коробова О.А. Состояние вопроса мониторинга подземных конструкций на современном этапе // О.А. Коробова, Л.А. Максименко. *Интерэкспо гео-сибирь*. – 2017, том 3, №2. С. 269-275.

18. Хиллер Б. Исследование автоматизированной системы деформационного мониторинга шлюзовых камер. // Б. Хиллер, Х.К. Ямбаев. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2016.-№3. С. 33-38.

19. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Монография. / Д.В. Ефанов – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с..

20. Хиллер Б. Цифровые инклинометры в системах автоматизированного геодезического мониторинга деформаций // Б. Хиллер. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, №6, 2015. – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2015. – С. 23-30.

21. Ефанов Д.В. Организация непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети // Д.В. Ефанов, Г.В. Осадчий, Д.В. Седых, Д.В. Барч. // *Транспорт Урала*. – 2017. – №:2 (53) с: 37-41 DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-37-41

22. Брынь М.Я. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий. // М.Я. Брынь, Е.Г. Толстов, А.А. Никитчин, Б. Резник, А.И. Яценко, О.В. Евстафьев, В.А. Кучумов. – 2009. «Известия Петербургского Университета Путей Сообщения», выпуск 2(19)/– СПб.: ПГУПС, 2009 – с.120-128.

23. Сырков А.В. Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга // А.В. Сырков, О.В. Крутиков. *Автоматизация в промышленности*. – 2012. - №9. С. 45-50.

24. Самитов Р.А. Системотехника организации инженерного мониторинга сложных строительных сооружений (на примере автодорожных мостов). Дисс. уч. ст. д.т.н. / Р.А. Самитов – 2001. – М. - 299 с.

25. Гарамов О.В. Элементы системы профилактического мониторинга железобетонных мостов региональной сети автомобильных дорог. Дисс. уч. ст. к.т.н. / О.В. Гарамов – 2005. – СПб. – 187 с.

26. Мазуров Б.Т. Изучение геодинамических процессов на основе моделирования геодезических и гравитационных параметров. Дисс. уч. ст. д.т.н. / Б.Т. Мазуров – 2007. – М. - 254 с.

27. Хазанов М.Л. Анализ напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций с использованием компьютерной измерительной системы. Дисс. уч. ст. к.т.н. / М.Л. Хазанов – 2007. – М. – 131 с.

28. Коргина М.А. Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий и сооружений в ходе мониторинга их технического состояния. Дисс. уч. ст. к.т.н. / М.А. Коргина – 2008. – М. – 225 с.

29. Никитчин А.А. Геоинформационный мониторинг вантовых мостов спутниковыми методами. Дисс. уч. ст. к.т.н. / А.А. Никитчин – 2009. – СПб. – 148 с.

30. Мизин В.Е. Совершенствование методов геодезического обеспечения мониторинга линейных объектов. Дисс. уч. ст. к.т.н. / В.Е. Мизин – 2012. – Новосибирск. – 180 с.

31. Скрипникова М.А. Разработка и совершенствование методик геодезических измерений для обеспечения эксплуатации гидротехнических сооружений и оборудования. Дисс. уч. ст. к.т.н. / М.А. Скрипникова – 2012. – Новосибирск. – 165 с.

Сведения об авторах (на трех языках):

Андрей Анатольевич Белый-техника ғылымдарының докторы, доцент, техникалық директор, "K2 Инжиниринг" ЖШҚ, Мәскеу, Ресей, andbeliy@mail.ru

Андрей Анатольевич Белый – Доктор технических наук, Доцент, Технический директор, ООО «K2 Инжиниринг», Москва, Россия, andbeliy@mail.ru

Andrei Belyi – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Position, Technical Director, “K2 Engineering” LLC, Moscow, Russia, andbeliy@mail.ru

Вклад авторов (укажите соответствующий вклад каждого автора):

А.А. Белый - концепция, методология, ресурсы, сбор данных, тестирование, моделирование, анализ, визуализация, интерпретация, подготовка текста, редактирование, получение финансирования.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Использование искусственного интеллекта (ИИ): не использовался

**КӨЛІК ЖӘНЕ АЗАМАТТЫҚ ИНФРАҚҰРЫЛЫМ ОБЪЕКТІЛЕРІНДЕ
ИНЖЕНЕРЛІК КОНСТРУКЦИЯЛАР МОНИТОРИНГІ ЖҮЙЕЛЕРІН ІСКЕ
АСЫРУ ТӘЖІРИБЕСІ МЕН ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ**

А.А. Белый^{*1} 

¹«K2 Инжиниринг» ЖШҚ (Мәскеу, Ресей)

*Корреспондент автор: andbeliy@mail.ru

Аңдатпа. Мониторинг-бұл көлік және Өнеркәсіптік-азаматтық инфрақұрылым объектілерінің техникалық жай-күйін басқарудың заманауи құралы. Мониторинг құрамында әртүрлі физикалық негіздері бар әртүрлі ішкі жүйелер бар. Мақаланың мақсаты - осы жүйелерді сипаттау, олардың әрқайсысының табиғатын қысқаша сипаттау. Зерттеу әдістемесі ретінде қолданыстағы негізгі тәсілдер қолданылды. Зерттеудің негізгі нәтижесі-әртүрлі ішкі жүйелерді жиынтықта, интегралды түрде қолдану мүмкіндігі. Бұл практикалық тұрғыдан максималды техникалық-экономикалық нәтиже береді.

Түйінді сөздер: мониторинг, техникалық жай-күй, көлік инфрақұрылымының объектілері, сенімділік, әсер.

**STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS ON TRANSPORT AND CIVIL
INFRASTRUCTURE OBJECTS: REALIZATION EXPERIENCE AND UP-TO-DATE
PERSPECTIVES**

А.А. Belyi^{*1} 

¹ «K2 Engineering» LLC (Moscow, Russia)

* Corresponding author: andbeliy@mail.ru

Abstract. Structural health monitoring is a modern tool for managing the technical condition of transport and industrial and civil infrastructure facilities. The monitoring includes various subsystems that have different physical foundations. The purpose of the article is to describe these systems, with a brief description of the nature of each of them. The existing basic approaches were

used as the research methodology. The main result of the study is the possibility of adequate application of various subsystems in aggregate, integrally. Which from a practical point of view gives the maximum technical and economic effect.

Key words: monitoring, technical condition, transport infrastructure objects, reliability, effect.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).