

DOI: 10.32347/2076-815x.2020.74.162-171

УДК 528.2

канд. техн. наук, доцент **Исаев А.П.**,
geo_i@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2175-0324,
доцент **Гуляев Ю.Ф.**, gulaev_uf@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7265-1975,
Чуланов П.А., chulanov.po@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6735-3770,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рекомендуется правильное написание названий систем мониторинга на основе смыслового содержания и логически согласованного порядка слов. Рассмотрены три составляющие системы комплексного мониторинга высотного здания, которые дополняют друг друга, создавая общую картину положения и состояния здания, его несущих конструкций и грунтового массива под ним. Рассматриваются в единстве геотехнический мониторинг, геодезический мониторинг, инженерно-строительный мониторинг. Показаны задачи каждого мониторинга и описаны приборы и датчики, которые используются в современных автоматизированных системах мониторинга.

Ключевые слова: системы мониторинга; геотехнический мониторинг; геодезический мониторинг; инженерно-строительный мониторинг; перемещения; осадка; деформации; напряжения; приборы и датчики мониторинга.

Актуальность темы. При проектировании зданий и сооружений обуславливается их надежность, то есть способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. При строительстве и эксплуатации необходим контроль показателей надежности несущих конструкций с целью не допустить предельного состояния строительного объекта, при превышении которого его эксплуатация недопустима, затруднена или нецелесообразна [1, 2].

Современное строительство (помимо обычного, традиционного), это во многом неповторимые крупные спортивные сооружения, большепролетные арены, стадионы, аквапарки, аэропорты, высотные здания. К уникальным инженерным сооружениям относятся также объекты атомной, химической, нефтегазовой, добывающей и перерабатывающей промышленности. К особым сооружениям относятся плотины на крупных реках, мосты и т.п. Для безопасной эксплуатации таких объектов создаются системы мониторинга, т.е. системы наблюдений за состоянием и положением объекта во времени и пространстве. Особенно актуальными являются автоматизированные системы,

способные обеспечить непрерывную качественную диагностику инженерных сооружений в обычных и экстремальных условиях. Они могут быть адаптированы для контроля опасных технологических процессов, для работы в условиях радиации, электромагнитного излучения, высоких температур и т.д.

Постановка задачи. Показать задачи и возможности основных видов мониторинга зданий и сооружений. Охарактеризовать основные виды мониторинга, которые в комплексе обеспечивают полный контроль над состоянием инженерных сооружений на протяжении всего их жизненного цикла. Привести примеры измерительных комплексов в каждом из них.

Изложение основного материала. Система мониторинга может быть стационарной и нестационарной. Стационарная система (СС) мониторинга предназначена в основном для непрерывного контроля, а нестационарная система (НС) мониторинга – для периодического контроля. Периодический контроль не совсем удобен при мониторинге быстроразвивающихся процессов, так как не дает информацию о состоянии объекта между периодами измерений.

Система мониторинга может быть автоматизированной, не автоматизированной или частично (в различной степени) автоматизированной. Автоматизированная система (АС) мониторинга (АСМ) производит измерения без участия человека, а не автоматизированная (или частично автоматизированная) система (НС) мониторинга предполагает участие человека. Возможна, например, стационарная автоматизированная система (САС) мониторинга или, например, нестационарная неавтоматизированная система (ННС), что еще довольно часто используется.

После того, как мы обозначили системы мониторинга, следует ответить на вопрос: какого мониторинга, какого вида? Такого, в котором используются технологии, приборы и методы измерений и контроля определенной научно-производственной дисциплины или отрасли экономики. Существуют понятия геодезического мониторинга, геологического, геофизического, инженерно-строительного,¹⁾ геотехнического мониторинга и другие. Такие мониторинги, как правило, проводятся для крупных ответственных сооружений для их безопасного строительства и эксплуатации. В статьях часто встречается название: «деформационный мониторинг». Это неправильное название, т.к. не может быть, например, «деформационной системы наблюдений».

Далее следует сказать, мониторинг каких процессов? Например, деформаций, осадок, смещений и кренов, изменений напряженно-деформированного состояния, собственной частоты колебаний, динамических воздействий.

¹⁾ – относится к понятию «строительная инженерия» (также инжиниринг) – инженерное обеспечение строительства, охватывающее все фазы реализации: проектирование, строительство, эксплуатацию объекта.

И, наконец, следует назвать объект. Например, высотное здание, мост, несущая конструкция промышленного сооружения, элементы строительной конструкции. Тогда пример правильной формулировки: «Стационарная автоматизированная система инженерно-строительного мониторинга деформаций несущих конструкций высотного здания)».

Система мониторинга может быть комплексной, объединяющей мониторинги разного вида. Будем считать основными направлениями этой системы геотехнический мониторинг, геодезический мониторинг и инженерно-строительный мониторинг. Другие виды так же важны, особенно такие, которые следят за состоянием равновесия природо-технической геосистемы (ПТГС). Однако для технического объекта названные виды мониторинга, с нашей точки зрения, являются определяющими. [5, 6].

В геотехническом мониторинге сооружений с высоким уровнем ответственности и классом безопасности, например, уникальных высотных зданий, используются методы инженерной геодезии, инженерной геологии, геофизики, гидрогеологии и другие. В задачи геотехнического мониторинга входят геодезические и инженерно-строительные наблюдения (измерения) за окружающими зданиями и сооружениями, входящими в зону влияния нового строительства; наблюдения за проявлениями опасных геологических и других природных процессов; наблюдения за напряженно-деформированным состоянием грунтового массива, контактирующего с фундаментом [3; 4].

В автоматизированных системах геотехнического мониторинга используются скважинные инклинометры, скважинные экстензометры, датчики давления грунта в сочетании с приборами геодезического мониторинга.

При строительстве подземной части высотного здания устанавливают автоматизированные системы мониторинга за массивами грунта, конструкциями фундамента и грунтовым основанием. Например, вокруг фундамента в пробуренные скважины устанавливают: скважинные инклинометры для контроля оползневых перемещений грунта, перемещения свай при горизонтальных нагрузках, деформаций конструкций фундамента; скважинные экстензометры для контроля оседания грунтов; скважинные пьезометры для контроля порового давления. Под подошвой фундамента устанавливают датчики давления на грунт. На подземных конструкциях, фундаменте и в стволах свай устанавливают датчики деформаций [8; 9].

Существует очень большое разнообразие приборов – от механических до цифровых. Приведем лишь несколько примеров.

Скважинный инклинометр предназначен для измерения горизонтальных подвижек массива грунта с помощью датчиков маятникового типа. Цепь из нескольких датчиков опускается в специальную обсадную трубу скважины.

Обсадная труба имеет четыре направляющих паза для азимутального позиционирования датчика. При смещении грунтового массива обсадная труба деформируется вместе с грунтом, вызывая изменения угла наклона прибора. По показаниям инклинометров, которые располагаются по всему массиву подвижного грунта, определяют относительные горизонтальные смещения по двум координатным осям.

Скважинный экстензометр предназначен для измерения вертикальных подвижек массива грунта с помощью датчика перемещения. Датчик состоит из металлической струны, протянутой в обсадной трубе и закрепленной анкером в плотных грунтах. Сверху струна закреплена на оголовке скважины. При вертикальных подвижках грунта изменяется натяжение струны, что фиксируется измерительным модулем. Чувствительным элементом датчика может быть тензодатчик или оптоволокно.

Датчик давления грунта предназначен для контроля неравномерных осадок фундамента в результате измерения давления на грунт в основании сооружения. Состоит из гидравлической камеры, мембрана которой соединена с металлической струной. При давлении на мембрану изменяется натяжение и резонансная частота колебаний струны, что фиксируется измерительным модулем. Чувствительным элементом датчика может быть тензодатчик.

В системах геодезического мониторинга используют геодезические приборы, технологии и методы измерений для определения пространственного положения здания в статике на определенные моменты времени, а также о динамике угловых и линейных смещений здания в целом, и о относительной динамике его частей и конструкций (фундаментов и основания, несущих конструкций подземной и надземной части, верха здания относительно нижней части). Измеряются координаты контрольных точек (обозначенных в техническом задании генпроектировщиком для определения смещений, изменений размеров и форм) и датчиков смещений и деформаций для привязки их к системе координат здания.

В автоматизированных системах геодезического мониторинга используются роботизированные тахеометры, аппаратура GNSS, в сочетании с приборами инженерно-строительного и геотехнического мониторинга [12].

В системах инженерно-строительного мониторинга используют измерительные аппаратно-программные комплексы для измерения напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов. Измерительный аппаратно-программный комплекс состоит из датчиков, имеющих чувствительный элемент, измерительных модулей, принимающих и преобразующих сигналы от датчиков, и регистрирующего блока, обрабатывающего с помощью ПО все сигналы от измерительных модулей.

Датчик – это компонент измерительного устройства, преобразующий изменение контролируемой физической величины в сигнал, удобный для измерения, передачи, обработки, регистрации и т.д. В автоматизированных системах мониторинга применяют большое количество разного рода датчиков, измеряющих прямо или косвенно разнообразие физические величины, несущие информацию о параметрах контролируемых конструкций. Например, в АСМ высотных зданий может быть использовано более двух тысяч датчиков.

С помощью датчиков закрепленных на или в несущих элементах проводятся измерения температуры, давления, влажности, вибраций (колебаний), напряжений, деформаций, наклонов, перемещений, трещин и других параметров состояния и относительного положения элементов строительных конструкций [9]. Виды и типы датчиков, и их количество подбираются в зависимости от решаемой задачи (технического задания). Приведем выборочные данные из классификации датчиков деформации, используемых в АСМ, по некоторым основным признакам, исходя из современного уровня производства.

1. В зависимости от вида подлежащего измерению параметра различают датчики измерения деформаций, перемещений (линейных, угловых), температуры и т.д.

Датчики деформации (экстензометры) в самом простом случае позволяют получить информацию о деформации растяжения (сжатия) на отдельном участке конструкции. Для измерения более сложных видов деформации используются, так называемые, распределенные системы, составленные из отдельных датчиков. На сегодняшний день большое распространение получили такие датчики деформации как резистивные и волоконно-оптические.

2. В зависимости от вида выходной величины, в которую преобразуется измеряемая датчиком величина, различают датчики электрические, волоконно-оптические, механические и другие.

3. По принципу действия электрические датчики можно разделить на резистивные, фотоэлектрические, индуктивные, ёмкостные и другие. Волоконно-оптические датчики можно разделить на два типа: на решетках Брэгга; на интерферометре Фабри-Перро.

Действие *резистивных датчиков* основано на том, что изменяется активное сопротивление чувствительного элемента датчика (резистора, тензорезистора, пьезорезистора) при изменении его длины, площади сечения или удельного сопротивления во время деформации. Чувствительный элемент датчика приклеивается к ЭСК и деформируется вместе с ним. Деформация вызывает изменение сопротивления в цепи датчика (например, в мостовой схеме Уитстона) и изменение напряжения на выходе. По показаниям

вольтметра можно однозначно судить о степени деформации резистора, а значит и строительного элемента, к которому он прикреплен [10].

Действие *волоконно-оптических датчиков деформации* (ВОДД) основано на отражении света, проходящего по оптическому волокну во время деформации. Чувствительным элементом для первого типа датчиков является оптоволокно с дифракционными решётками Брегга. Чувствительный элемент жестко крепится на деформируемой конструкции и деформируется вместе с ней. Деформации приводят к локальным растяжениям/сжатиям оптических нитей, что меняет период брегговской решётки и приводит к изменению отражательных и спектральных свойств проходящего света. Отражённое излучение фиксируется и анализируется [11].

Чувствительным элементом для второго типа датчиков является оптоволокно с интерферометром. Один торец волокна полупрозрачен, а второй (дальний) полностью отражает свет. Свет, отраженный от двух торцовых поверхностей, подаётся на приёмник, где формируется интерференционная картина. Деформации растяжения/сжатия приводят к изменению длины интерферометра и, таким образом, к изменению интерференционной картины в приёмнике. Анализ интерференционной картины позволяет с большой точностью определить величину деформации.

Выводы. Для строящегося или эксплуатируемого высотного здания, как в общем и для любого инженерного сооружения высокой степени ответственности, осуществляется комплексный мониторинг, который должен обеспечить информацией соответствующие инженерные службы.

Основными компонентами такого мониторинга являются геотехнический, геодезический и инженерно-строительный мониторинг. Эти три составляющие дополняют (по информативности, по точности, по возможностям) и частично перекрывают друг друга, создавая единый информационный блок с обобщающей информацией в любой заданный момент времени.

С изменением напряженно-деформированного состояния конструкций здания под действием внешних воздействий информация, поступающая с датчиков деформации, покажет, какого этапа состояния достигли силовые и температурные деформации [13]. При этом другие приборы и датчики АСМ могут зафиксировать планово-высотные и угловые смещения несущих конструкций, изменения их взаимного положения и напряженно-деформированного состояния. Приборы и датчики АС геотехнического и геодезического мониторинга покажут изменения в массиве грунта, который находится под строящимся зданием и вокруг него.

Специалисты, следящие за детальным развитием деформаций в несущих элементах и получившие такую информацию, могут выявить места

возникновения критических значений там, где они выходят из зоны упругих деформаций. При этом они могут видеть общую картину положения и состояния здания, грунтового массива и всей зоны геотехнического влияния. Для того чтобы объединить поступающую информацию, она должна подаваться в единый оперативный центр, обладающий специальным программным обеспечением.

Литература

1. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ, 2018. 38 с.
2. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, 2017. 47 с.
3. ДБН В.1.2-12-2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки. Київ, 2008. 31 с.
4. ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. Київ, 2007. 14 с.
5. ДСТУ-Н Б В.1.2.-17:2016 Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. Київ, 2016. 42 с.
6. МРДС 02-08 Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. М., 2008. 76 с.
7. ДБН В.1.3-2:2010 Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи в будівництві. Київ, 2010. 40 с.
8. Геотехнический мониторинг во время строительства. URL: <http://tehlib.com/ispy-taniya-i-obsledovaniya-zdanij-i-sooruzhenij/geotehnicheskij-monitoring-vo-vremya-stroitelstva/> (дата звернення: 11.05.2020).
9. 3000 глаз для искусственного интеллекта. Как устроена система мониторинга конструкций Лахта Центра. URL: <https://habr.com/ru/company/lakhtacenter/blog/414549/> (дата звернення: 11.05.2020).
10. Цифровые тензометрические датчики и датчики деформации. URL: <https://zetlab.com/product-category/tsifrovyie-datchiki/tsifrovyie-datchiki-i-izmeritelnyie-moduli/tsifrovyie-tenzometricheskie-datchiki/> (дата звернення: 11.05.2020).
11. Датчики деформации (экстензометры). URL: http://www.devicesearch.ru.com/article/datchiki_deformacii (дата звернення: 11.05.2020).
12. Курсин А.Н. Проблемы постановки и развития геодезического мониторинга деформаций АЭС. URL: <file:///E:/16.%20%D0%94%20%D0%95%20%D0%A4%20%D0%9E%20%D0%A0%20%D0%9C%20%D0%90%20>

[%D0%A6%20%D0%98%20%D0%98/%D0%94%20%D0%95%20%D0%A4%20%D0%9E%20%D0%A0%20%D0%9C/Kursin_AtStSt_2015.pdf](#) (дата звернення: 11.05.2020).

13. Исаев А.П. Принципы измерения осадки статически неопределимых конструкций (на примере прямолинейного вертикального стержня) / А.П. Исаев, Р.В. Шульц, Ю.Ф. Гуляев, В.С. Стрилец // Инженерная геодезия: науч.-техн. сб. – К.: КНУБА, 2017. – Вып. 64. – С. 55-66.

канд. техн. наук, доцент Исаев О.П.,
доцент Гуляев Ю.Ф., Чуланов П. О.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

КОМПЛЕКСНИЙ МОНІТОРИНГ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

У статті рекомендується правильне написання назв систем моніторингу на основі смислового змісту і логічно узгодженого порядку слів. Розглянуто три складові системи комплексного моніторингу висотної будівлі, які доповнюють один одного, створюючи загальну картину положення і стану будівлі, її несучих конструкцій і ґрунтового масиву під нею. Розглядаються в єдності геотехнічний моніторинг, геодезичний моніторинг, інженерно-будівельний моніторинг. Показані завдання кожного моніторингу та описані прилади та датчики, які використовуються в сучасних автоматизованих системах моніторингу. Геотехнічний моніторинг дає інформацію про стан і зміщення ґрунтової основи, яка знаходиться під будівлею і навколо неї, про процеси, що відбуваються всередині ґрунтового масиву. В автоматизованих системах геотехнічного моніторингу використовуються свердловинні інклінометри, свердловини екстензометри, датчики тиску ґрунту в поєднанні з приладами геодезичного та інженерно-будівельного моніторингу. Геодезичний моніторинг дає уявлення про просторове положення будівлі та її елементів, а також про планово-висотні та кутові зміщення несучих конструкцій. В автоматизованих системах геодезичного моніторингу використовуються роботизовані тахеометри, нівеліри, сканери, апаратура GNSS в поєднанні з приладами інженерно-будівельного і геотехнічного моніторингу. Інженерно-будівельний моніторинг показує зміни напружено-деформованого стану конструкцій та їх елементів і зміни їх взаємного положення. В автоматизованих системах інженерно-будівельного моніторингу використовуються різного типу датчики: деформацій, зміщень, коливань, температури, тиску та інші в поєднанні з приладами геодезичного та геотехнічного моніторингу.

Ключові слова: системи моніторингу; геотехнічний моніторинг; геодезичний моніторинг; інженерно-будівельний моніторинг; зміщення; осадка; деформації; напруження; прилади та датчики моніторингу.

Ph.D., associate Professor Isayev Alexander,
associate Professor Gulayev Yriy, Chulanov Petr ,
Kyiv National University of Construction and Architecture

INTEGRATED MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES

The article recommends the correct spelling of the names of monitoring systems based on semantic content and a logically consistent word order. Three components of the complex monitoring system of a high-rise building are considered, which complement each other, creating a general picture of the position and condition of the building, its load-bearing structures and the soil mass under it. Geotechnical monitoring, geodetic monitoring, and civil engineering monitoring are considered in unity. The tasks of each monitoring are shown and instruments and sensors that are used in modern automated monitoring systems are described.

Geotechnical monitoring provides information about the condition and displacement of the soil base, which is located under the building under construction and around it, about the processes taking place inside the soil massif. Automated systems for geotechnical monitoring use downhole inclinometers, downhole extensometers, soil pressure sensors in combination with geodetic and civil engineering monitoring devices.

Geodesic monitoring gives an idea of the spatial position of the building and its elements, as well as the plan-height and angular displacements of the supporting structures. Automated systems of geodetic monitoring use robotic total stations, levels, scanners, GNSS equipment in combination with instruments for civil engineering and geotechnical monitoring.

Engineering and construction monitoring shows changes in the stress-strain state of structures and their elements and changes in their mutual position. Automated systems for engineering and construction monitoring use different types of sensors: deformations, displacements, vibrations, temperature, pressure, and others in combination with geodetic and geotechnical monitoring devices.

Key words: monitoring systems; geotechnical monitoring; geodetic monitoring; civil engineering monitoring; displacement; draft; deformation; stress; monitoring instruments and sensors.

REFERENS

1. DBN V.1.2-14:2018 Zagalni principi zabezpechennya nadijnosti ta konstruktivnoyi bezpeki budivel i sporud. Kiyiv, 2018. 38 s. {in Ukrainian}.
2. DSTU-N B V.1.2-18:2016 Nastanova shodo obstezhennya budivel i sporud dlya viznachennya ta ocinki yih tehničnogo stanu. Kiyiv, 2017. 47 s. {in Ukrainian}.
3. DBN V.1.2-12-2008 Sistema zabezpechennya nadijnosti ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. Budivnictvo v umovah ushilnenoyi zabudovi. Vimogi bezpeki. Kiyiv, 2008. 31 s. {in Ukrainian}.
4. DBN V.1.2-5:2007. Naukovo-tehničnij suprovid budivelnih ob'ektiv. Kiyiv, 2007. 14 s. {in Ukrainian}.
5. DSTU-N B V.1.2.-17:2016 Nastanova shodo naukovo-tehničnogo monitoringu budivel i sporud. Kiyiv, 2016. 42 s. {in Ukrainian}.
6. MRDS 02-08 Posobie po nauchno-tehničeskomu soprovozhdeniyu i monitoringu stroyashihsya zdaniy i sooruzhenij, v tom chisle bolsheproletnyh, vysotnyh i unikalnyh. M., 2008. 76 s. {in Russian}.
7. DBN V.1.3-2:2010 Sistema zabezpechennya tochnosti geometrichnih parametriv u budivnictvi. Geodezichni roboti v budivnictvi. Kiyiv, 2010. 40 s. {in Ukrainian}.
8. Geotehničeskij monitoring vo vremya stroitelstva. URL: <http://tehlib.com/istry-taniya-i-obsledovaniya-zdaniy-i-sooruzhenij/geotehničeskij-monitoring-vo-vremya-stroitelstva/> (data zvernennya: 11.05.2020). {in Russian}.
9. 3000 glaz dlya iskusstvennogo intellekta. Kak ustroena sistema monitoringa konstrukcij Lahta Centra. URL: <https://habr.com/ru/company/lakhtacenter/blog/414549/> (data zvernennya: 11.05.2020). {in Russian}.
10. Cifrovyje tenzometricheskie datchiki i datchiki deformacii. URL: <https://zetlab.com/product-category/tsifrovyie-datchiki/tsifrovyie-datchiki-i-izmeritelnyie-moduli/tsifrovyie-tenzometricheskie-datchiki/> (data zvernennya: 11.05.2020). {in Russian}.
11. Datchiki deformacii (ekstenzometry). URL: http://www.devicesearch.ru.com/article/datchiki_deformacii (data zvernennya: 11.05.2020). {in Russian}.
12. Kursin A.N. Problemy postanovki i razvitiya geodezicheskogo monitoringa deformacij AES. URL: file:///E:/16.%20%D0%94%20%D0%95%20%D0%A4%20%D0%9E%20%D0%A0%20%D0%9C%20%D0%90%20%D0%A6%20%D0%98%20%D0%98/%D0%94%20%D0%95%20%D0%A4%20%D0%9E%20%D0%A0%20%D0%9C/Kursin_AtStSt_2015.pdf (data zvernennya: 11.05.2020). {in Russian}.
13. Isaev A.P. Principy izmereniya osadki staticheski neopredelimyh konstrukcij (na primere pryamolinejnogo vertikalnogo sterzhnya) / A.P. Isaev, R.V. Shulc, Yu.F. Gulyaev, V.S. Strilec // Inzhenerna geodeziya: nauk.-tehn. zb. – K.: KNUBA, 2017. – Vip. 64. – S. 55-66. {in Russian}.