

**ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА
ДЕФОРМАЦИИ НЕСУЩЕГО КАРКАСА ВЫСОТНОГО
ЗДАНИЯ**

СНЕЖКОВ Д. Ю., ЛЕОНОВИЧ С. Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В статье представлен опыт эксплуатации системы автоматизированного мониторинга высотного здания с использованием датчиков углов наклона несущих колонн. В качестве методической основы обработки данных мониторинга рассмотрен корреляционный анализ углов наклона колонн каркаса здания.

Введение. Использование в высотном строительстве бетонов высокой прочности, склонных к хрупкому разрушению, усиливает опасность прогрессирующего обрушения конструкций [1], когда вплоть до катастрофического развития этого процесса, явных внешних признаков снижения несущей способности конструкции может и не наблюдаться. Своевременно обнаружить начальную стадию такого рода событий позволяют системы автоматической непрерывной регистрации деформационного состояния несущих конструкций, при высокой чувствительности измерительной системы к контролируемым параметрам деформации.

Практическое использование систем автоматизированного мониторинга состояния несущих конструкций высотных зданий является относительно новой темой в перечне вопросов безопасной эксплуатации строительных сооружений в республике Беларусь. Тем не менее, накопленный опыт эксплуатации несколько таких систем на объектах г.Минска в течении последних 5 лет позволяет сформулировать некоторые общие для всех систем ключевые вопросы, требующие решения как на стадии проектирования и монтажа системы автоматизированного мониторинга, так и в период её эксплуатации.

Для отслеживания деформации несущего каркаса наиболее распространенными типами сенсоров являются: датчики линейной

деформации (сжатия-растяжения), датчики углов наклона элементов (инклинометры), датчики акустической эмиссии, датчики вибрации (акселерометры), датчики ветровой нагрузки (анемометры). Установка датчиков линейной деформации, независимо от физического принципа их работы, требует, как правило, достаточно протяженной базы, на которой производится регистрация взаимного перемещения контрольных точек конструкции [2], что может быть неприемлемым по архитектурным или эстетически соображениям. Сильная связанность элементов железобетонного монолитного каркаса здания в пределах каждого этажа и, соответственно, - взаимная зависимость деформации элементов, позволяет минимизировать число контролируемых элементов каркаса. Для обнаружения накапливающихся деформаций несущего каркаса в качестве информационных параметров могут быть использованы только углы наклона нескольких ключевых конструкций каркаса, измеряемых высокочувствительными сенсорами. Именно таким образом решается задача мониторинга высотного здания «Современный многофункциональный торгово-развлекательный комплекс с гостиницей и паркингом на проспекте Победителей в г. Минске». Комплекс представляет собой 21-этажное здание, состоящее из двух основных частей: шестиэтажной стилобатной части (торгового центра) и 14-этажной гостиницы. Верхняя отметка здания – +85,650 м. Основу несущего каркаса объекта составляли несущие монолитные колонны, диски монолитных перекрытий и элементы поперечной жесткости. Регистрация деформационных изменений состояния несущего каркаса осуществлялась датчиками угловых перемещений – инклинометрами, обеспечивающими измерение углов своего наклона в двух ортогональных вертикальных плоскостях X и Y с погрешностью, не превосходящей 10–3 углового градуса.

Компактность конструкции используемой модели инклинометров в совокупности с беспроводным интерфейсом позволяют их легко устанавливать на элементах каркаса зданий, находящихся в эксплуатации, а при необходимости – менять места установки. Наклон контролируемой конструкции может быть обусловлен рядом факторов: изменением вектора нагрузки, изменением упругопрочностных свойств материала конструкции, изменением параметров взаимных связей элементов конструкции и смежных

конструкций между собой, и температурным расширением-сжатием железобетона.

Другой важный вопрос, возникающий в начале эксплуатации системы автоматизированного мониторинга – алгоритм формирования так называемого аларм-сигнала, – выявление предаварийной ситуации объекта. В настоящее время четкой однозначной регламентации этого вопроса нет. Отечественные нормативы – ТКП 45-3.02-108-2008, ТКП 45-1.01-234–2015 – дают лишь общие рекомендации для углового отклонения всего здания в целом, которое для расстояния от верха фундамента до верха несущих конструкций покрытия h не должны превышать:

- при h , м до 150 – 1/500;
- то же до 200 – 1/600,

что составляет в пересчете в угловые единицы соответственно $0,114^\circ$ и $0,095^\circ$. Эти значения закладываются в систему в качестве граничных.

В качестве дополнительного ориентира для оценки предаварийного состояния здания можно рассматривать тенденцию в развитии деформации элементов каркаса: скорость (и ускорение) деформативных изменений, и, соответственно, прогнозное время достижения деформацией граничных значений.

Не менее важной является задача выбора ключевых элементов наиболее чувствительных к вероятным деформациям каркаса. Перспективу в решении указанной задачи может открыть технология информационного моделирования зданий (Building Information Modelling – BIM). Разработанная на стадии проектирования и дополняемая в процессе возведения и эксплуатации трехмерная информационная модель здания, где для каждого элемента модели закладываются сведения о его фактических упруго-деформативных и прочностных параметрах, позволит по изменению состояния группы контролируемых элементов, рассчитать состояние остальных. Соответственно можно решать и обратную задачу – выбрать «ключевые» элементы. Разработка компьютерной модели должна являться неотъемлемой частью проекта здания.

Таким образом, создание системы мониторинга включает в себя решение следующих задач:

- выбора ключевых контролируемых элементов каркаса здания, обладающих наибольшей чувствительностью к вероятным видам деформации каркаса;

- выбора аппаратной основы измерительной системы, в первую очередь - перечня используемых сенсоров;

- формирования алгоритма оценки деформации силового каркаса здания по данным измерений состояния ключевых элементов каркаса, и на его основе – распознавание alarm – ситуации, при которой требуется принятие оперативных решений.

Технические средства системы мониторинга. Основными аппаратными элементами рассматриваемой системы сбора информации являются двухосевые сенсоры-инклинометры и центральный базовый блок, связь между которыми организована по сетевому принципу. Предусмотрены средства доступа к базовому блоку по выделенному каналу сети Internet. Контроль угловых отклонений колонн несущего каркаса производится сенсорами-инклинометрами, имеющими беспроводный интерфейс установленными на колоннах подвального, 7 и 21 этажах здания. Дополнительно на кровле здания установлены проводные сенсор скорости и направления ветра и сенсор-акселерометр. Кроме собственно датчика угловых перемещений каждый сенсор-инклинометр имеет в своем составе датчик температуры с разрешением $0,1^{\circ}\text{C}$. Обработка сигналов сенсоров происходит в режиме реального времени в центральном базовом блоке Автономный режим базового блока системы позволяет получать информацию от всех сенсоров, производя накопление данных с различным временным разрешением. Хранение данных мониторинга в базовом блоке производится на протяжении 20 лет непрерывного функционирования системы. В типовой настройке базового блока предусмотрено организация массива накопленных данных сенсоров-инклинометров в виде трех файлов, содержащих отсчеты данных с разрешением в 1 сутки, 1 час и 15 минут. Размер каждого файла ограничен ~ 250 записями, каждая из которых является результатом усреднения отсчетов сенсоров за соответствующий интервал времени. Типовое расположение сенсоров – инклинометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания (рис. 1).

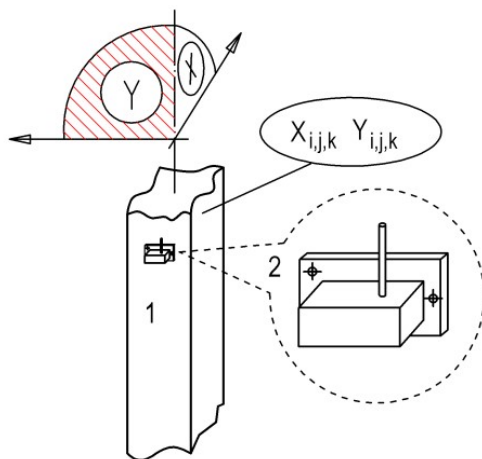


Рис. 1. Установка сенсора-инклинометра (2) на контролируемой колонне (1)

Программно-схемотехническое исполнение инклинометров и базового блока позволяет их дистанционное конфигурирование: установку параметров чувствительности сенсоров и их начального – нулевого значения отсчетов, периода опроса, параметров конфигурирования информационной сети и др.

Результаты мониторинга, анализ данных. В основе мониторинга конструкций лежит принцип регистрации угловых отклонений сенсора от нормального (первоначального) положения в режиме реального времени. Визуализацию деформационных изменений несущего каркаса здания удобно осуществлять через построение годографов угловых перемещений колонн в полярных координатах, привязанных к координатной сетке здания (см. рис. 3). Угловая координата (азимут) ang годографа рассчитывается по формуле

$$\text{ang} = \text{arctg} \left(\frac{x^*}{y^*} \right), \quad (1)$$

где x^* , y^* – значения угловой составляющей каждого сенсора в приведенной системе координат.

Расчет модулей mod углов производился по формуле

$$\text{mod} = \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2}. \quad (2)$$

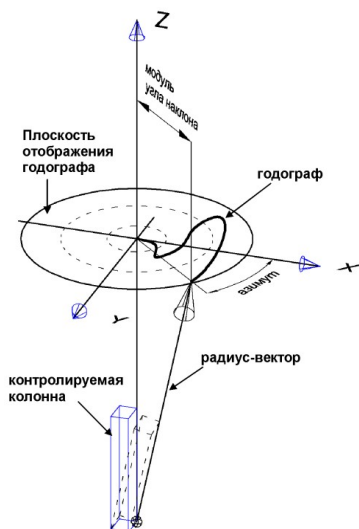


Рис. 2. Схема отображения данных угловых отклонений колонн здания

На рис. 2 приведен годограф перемещений одного из сенсоров 21 этажа в плоскости осей X^* , Y^* . За период наблюдений (19.08.2015 – 13.03.2018) средняя величина модуля угловых перемещений колонн по этажам составила $0,007 \dots 0,031$ углового градуса. Значимая корреляция средних значений угла наклона колонн по этажам не выявлена, что косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком.

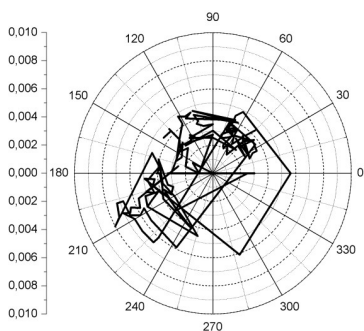


Рис. 3. Годограф наклона колонны 21 этажа здания за период с августа 2015 г. по март 2018 г.

Для уточнения наблюдаемой деформационной картины выполнен корреляционный анализ сигналов сенсоров в пределах отдельных этажей, а также оценка корреляции усредненных углов наклона между этажами, и определена корреляция угловых отклонений контролируемых элементов объекта с их температурой. В таблице приведены значения межэтажных коэффициентов взаимной корреляции средних значений модулей наклона и средних значений азимутов наклона колонн.

Таблица

Коэффициенты корреляции средних по этажам модулей векторов наклона колонн

| Этажи | Коэфф. корреляции <i>mod</i> годографов | Коэфф. корреляции. азимутов годографов |
|----------------|---|--|
| 21 эт – 7эт | 0,71 | 0,06 |
| 21 эт - подвал | 0,86 | -0,04 |
| 7 эт - подвал | 0,85 | 0,26 |

Результаты анализа показали (см. таблицу), что взаимная корреляция среднего значения модулей углов наклона колонн этажей является значимой – $r = 0,7-0,86$, что указывает на общую причину вариации модулей углов наклона. В то же время корреляция азимутальных углов практически отсутствует. Это косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком. Годографы векторов деформации отдельных колонн (рис. 4) имеют стохастический характер и не выходят за пределы характерной устойчивой области, что также свидетельствует об отсутствии накопления деформаций вследствие усадочных процессов в элементах конструкций и фундаменте здания.

Выявлена значимая корреляция угловых перемещений колонн от температуры. На рис. 4 показаны совместные диаграммы изменений модуля угла наклона одной из колонн и температуры.

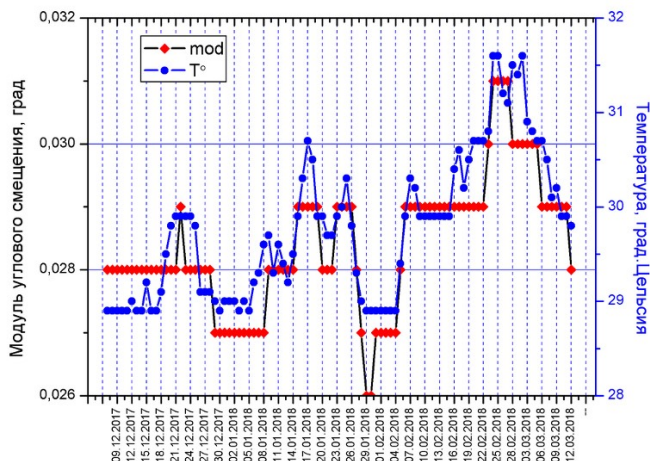


Рис. 4. Временные диаграммы угловых смещений сенсора подвала здания и его температуры за период декабрь 2017 г.–март 2018 г.

Для датчиков высотной части здания устойчивое и близкое к 1 значение коэффициента корреляции наблюдалось в интервале температур $+16^{\circ}\dots+26^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 5) [3]. Сильная зависимость углов наклона колонн от температуры приводит к тому, что при резких колебаниях температуры угол наклона колонны также резко меняется. Быстрое нарастание угла наклона, даже в пределах ниже установленных максимальных допусков, может расцениваться как состояние близкое к предаварийному. Чтобы избежать ложных срабатываний системы тревоги температурный фактор следует учитывать.

Разработанная методика компенсации колебаний температуры базируется на расчете и введении температурной поправки для каждой из ортогональных составляющих угла наклона колонны. Чувствительность углов наклона X , Y колонны к изменению температуры t определяется коэффициентом регрессии A_1 в соответствующих уравнениях

$$\begin{aligned} X &= A_{1,X} \cdot t + A_{0,X}, \\ Y &= A_{1,Y} \cdot t + A_{0,Y}. \end{aligned} \quad (3)$$

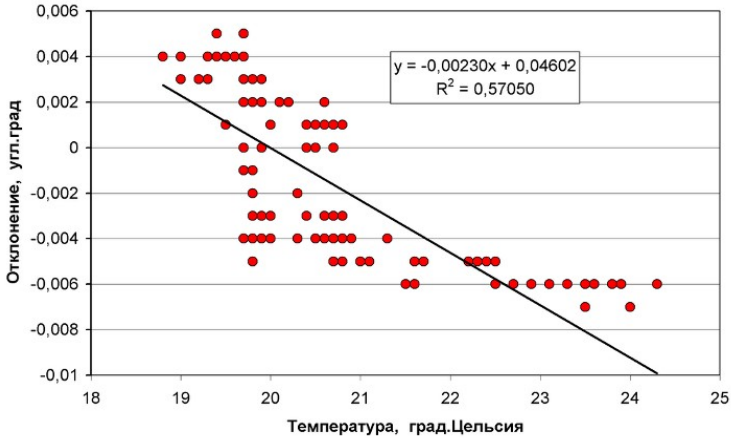


Рис. 5. Зависимость Y-составляющей наклона колонны ID-01 от температуры: период наблюдения II

Как показал анализ данных мониторинга за 2-летний период наблюдения объекта, коэффициент регрессии не является постоянной величиной. Наибольшие его изменения связаны с периодом монтажа технологического оборудования, также с запуском системы отопления и кондиционирования воздуха. Кроме того, проявился эффект связанный с температурной инерционностью строительных конструкций: максимального значения коэффициент корреляции углов наклона колонн с температурой достигался не для текущих значений температуры, а для значений зарегистрированных примерно сутки назад. Некоторое повышение точности температурной поправки достигалось учетом тепловой инерции конструкций здания. Характеристическое время задержки деформационной реакции от момента температурного перепада составило для сенсоров системы около 20–28 часов. Уточненные значения углов наклона X^* и Y^* рассчитывались по формулам

$$\begin{aligned} X_i^* &= X_i + A_{i,x}(t_0 - t_{i-1}), \\ Y_i^* &= Y_i + A_{i,y}(t_0 - t_{i-1}), \end{aligned} \quad (4)$$

где t_0 – приведенное значение температуры (принималось $+15^\circ\text{C}$);
 t – текущее значение температуры;
 i – текущая дата наблюдения.

На рис. 6 показана диаграмма для коэффициентов регрессии $A_{1,x}$ и $A_{1,y}$ для сенсора 21 этажа. На диаграмме выделены два характерных периода: период I – введение объекта в эксплуатацию и эксплуатация объекта без включения системы отопления; период II – октябрь 2017 г. по март 2018 – эксплуатация объекта с включенной системой отопления.

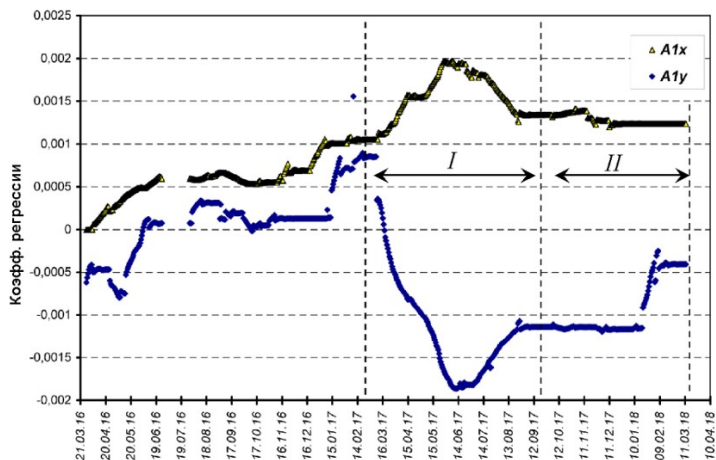


Рис. 6. Зависимость Y-составляющей наклона колонны 01 от температуры: I и II – периоды наблюдения

Коэффициенты регрессии рассчитывались по методу скользящего среднего, длительность усредняющего периода наблюдения принималась 20 суток.

На рисунке 7 приведены годографы наклона одной из колонн 21 этажа для периодов наблюдения I и II. Отчетливо видно сокращение области вариации годографа при введении температурной поправки. Для периода наблюдения I вариация X- координата уменьшилась на 33 %, Y – координата - на 30 %. Для периода II уменьшение вариации составляющих X и Y составило соответственно 57 % и 30 %. Визуально по рис. 7 можно также отметить не только лучшую «компактность» областей I обоих годографов, но и меньшую миграцию этих областей в показанных координатах. Для областей 2 этот показатель заметно больше.

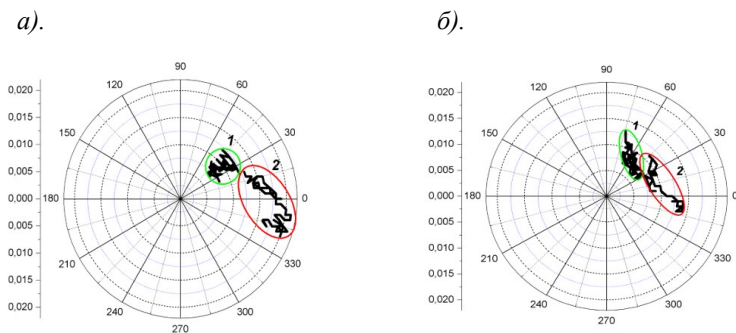


Рис. 7. Годографы наклона колонны 01:
a – период наблюдения I; *b* – период наблюдения II;
 1 – с температурной коррекцией; 2 – без температурной коррекции

Заключение. Выполненные работы показали эффективность инклинометров в качестве чувствительной измерительной основы автоматизированной системы мониторинга деформации несущего каркаса строительных объектов. Данные мониторинга подтверждают статистическую обоснованность значений чувствительности сенсоров инклинометров на уровне 0,001 углового градуса.

В качестве методической основы обработки данных системы предлагается корреляционный анализ приращений углов наклона ключевых конструкций.

За весь период наблюдения 2015–2018 гг. диапазон вариации углов наклона контролируемых колонн объекта составил 0,007–0,031 углового градуса. Связанное с проведением работ по монтажу технологического оборудования здания максимальное зарегистрированное кратковременное отклонение достигло значения 0,04 углового градуса, что составляет 36% от условного максимально допустимого значения. За период эксплуатации здания в 2017–2018 гг. диапазон девиации углов наклона контролируемых колонн сократился и составил 0,005–0,013 углового градуса.

Выявлено сильное влияние на показатели деформации несущего каркаса здания вариации температуры. Угловые отклонения колонн за счет температурного фактора имеют обратимый характер. Значительное влияние на величины температурных составляющих деформации оказывает режим работы системы кондиционирования-отопления здания.

За период наблюдения эксплуатируемого здания с марта 2017 года по март 2018 г. температурный фактор определял 30–60% всего диапазона вариации углов наклона контролируемых колонн. В связи с этим особое значение приобретает вопрос о степени адекватности наклонных перемещений, обусловленных вариацией температуры, и фактических напряжений в конструкциях. Решение этого вопроса видится в использовании компьютерных моделей каркаса здания. Для калибровки модели и её адаптации к реальным регистрируемым величинам деформации каркаса и отдельных его элементов следует оснащать отдельные группы сенсоров-инклинометров сенсорами линейной деформации, а также использовать данные прямых геодезических измерений.

По результатам мониторинга выработан ряд рекомендаций по выбору сенсоров и мест их установки на элементах конструкций, в частности, рекомендуется устанавливать инклинометры не на отдельные конструкции, а группами на места сопряжения конструкций. Например, два сенсора монтируются на смежных по высоте колоннах и один сенсор на диске перекрытия. Отдельные группы сенсоров, контролирующих однотипные конструкций, необходимо дополнять сенсором линейной деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев, В.В. Автоматизированные станции мониторинга деформационного состояния (СМДС) и их применение на строительных объектах / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев, В.Г. Катренко, [и др.] // «Стройпрофиль», №1(71), 2009, С.3-6.
2. Минченя, В.Т. Информационные технологии в строительстве / В.Т. Минченя [и др.] // в сборнике статей Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы инновационной подготовки инж. кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты».- 2015, Минск, БНТУ, С. 174–180.
3. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.
4. Boldyrev G.G., Zhivaev A.A. System for Static and Dynamic Monitoring and Ice Sport Arena. Proceed. of the 8th Internat. Workshop on Structural Health Monitoring. Ed. Fu-Kuo, Stanford University, USA, 2011, pp. 378-385.