

Снежков Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

Леонович Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, декан факультета, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ

© РУП «Институт БелНИИС», 2018
Institute BelNIIS RUE, 2018

АННОТАЦИЯ

Повысить уровень безопасности при возведении и эксплуатации уникальных и высотных строительных объектов позволяют системы автоматизированного мониторинга несущих конструкций. Эффективность таких систем заключается в оперативном – в режиме реального времени – выявлении и прогнозировании эволюции напряженно-деформированного состояния несущих конструкций здания. Выбор типа сенсоров, определение их количества и мест установки являются одной из задач при формировании оптимальной структуры системы мониторинга. Существует проблема выбора допустимых пределов деформации элементов каркаса.

В статье рассматриваются вопросы автоматизированного мониторинга высотных зданий с использованием датчиков углов наклона – инклинометров. Показатели чувствительности и долговременной стабильности метрологических характеристик инклинометров позволяют регистрировать практически любые деформационные изменения геометрии несущего каркаса здания, в том числе обусловленные вариацией температуры. Высокая чувствительность в сочетании с беспроводным интерфейсом позволяет оперативно, с малыми издержками организовать информационно-измерительную мониторинговую сеть, а при необходимости изменить ее конфигурацию.

Приведены данные мониторинга высотного здания в г. Минске. В качестве основы обработки данных мониторинга предлагается корреляционный анализ углов наклона колонн каркаса здания. Выявлена значимая корреляция углов наклона монолитных колонн здания и температуры. Определены показатели температурной чувствительности углов наклона контролируемых колонн. Выявлена зависимость этих показателей от сезонных факторов. Предложена методика расчета и автоматической коррекции поправки для компенсации температурного фактора деформации. Это повышает чувствительность системы к вариации силовых нагрузок на каркас здания при одновременном снижении вероятности формирования ложного сигнала тревоги.

Ключевые слова: мониторинг, инклинометр, несущий каркас, угловое отклонение, деформация, корреляция, температура.

Для цитирования: Снежков, Д. Ю. Автоматизированный мониторинг высотного здания с учетом фактора температуры / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 233–249. <https://doi.org/10.23746/2018-10-15>

Dmitry Snezhkov, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Sergei Leonovich, DSc in Engineering Science, Professor, Dean of the faculty, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

AUTOMATED MONITORING OF HIGH-RISE BUILDINGS TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE FACTOR

ABSTRACT

To increase the safety level in the construction and operation of unique and high-rise construction projects allow automated monitoring of load-bearing structures. The effectiveness of such systems lies in the operational

– in real time – detection and forecasting of the bearing structures stress-strain state evolution. Choosing the type of sensors, determining their number and installation places is one of the tasks in the formation of the optimal monitoring system structure. There is a problem of choice of admissible limits of deformation of frame elements.

In the article questions of the automated monitoring of high rise buildings with use of tilt angles sensors – inclinometers are considered. The sensitivity and long-term stability of the metrological characteristics of the inclinometers it is possible to register almost any deformation changes the geometry of the building structural framing, including due to the temperature variation. High sensitivity in combination with the wireless interface allows you to quickly, with low costs to organize information and measurement monitoring network, and change its configuration if necessary. The experimental monitoring data of a high-rise building in Minsk are given. The correlation analysis of the inclination angles of the building frame columns is proposed as a basis for processing the monitoring data. A significant correlation between the inclination angles of monolithic columns and the temperature is revealed. The temperature sensitivity parameters of the tilt angles of the controlled columns are determined. The dependence of these parameters on seasonal factors is revealed. The method of calculation and automatic compensation of temperature factor of deformation is offered. This increases the sensitivity of the system to the variation of power loads on the building frame, while reducing the probability of forming a false warning messages.

Keywords: monitoring, inclinometer, load-bearing framework, angular deviation, deformation, correlation, temperature.

For citation: Snezhkov D., Leonovich S. Automated monitoring of high-rise buildings taking into account the temperature factor. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. Pp. 233–249. <https://doi.org/10.23746/2018-10-15> (in Russian)

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 нескольких таких систем на объектах г. Минска в течение 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 ее эксплуатации.

Первая задача, с которой сталкивается проектировщик системы автоматизированного мониторинга, – сокращение перечня контролируемых параметров, который в значительной мере определяет ее стоимость. Снабжать каждый элемент силового каркаса здания всем перечнем сенсоров не представляется целесообразным не только по причине увеличения ее стоимости, но и по причине информационной избыточности получаемого потока данных. Показания большей части сенсоров будут либо дублировать друг друга, либо иметь сильную взаимную корреляцию по причине сильной пространственной связанности элементов, при которой изменение геометрии или пространственного положения одного элемента неизбежно отразится на состоянии других.

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 эстетическим 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» (рис. 1). 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.

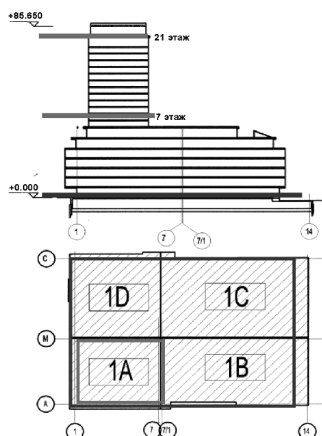


Рисунок 1. Общий план объекта и периметров монтажа сенсоров

Основу несущего каркаса объекта составляют 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 позволяет 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 упруго-прочностных 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, – критерий выявления 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° и 0,095°. 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 этажа стилобатной части, на 7-м и 21-м этажах высотной части здания (отметки +28,800 и +78,800). Дополнительно на кровле здания установлены 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 °С. 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 предусмотрена организация массива накопленных данных с временным разрешением в 1 сутки, 1 час и 15 минут. Типовое расположение сенсоров-инклинометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания (рис. 2). 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.

АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

Методическую основу мониторинга несущих конструкций здания составляет регистрация угловых отклонений сенсора от нормального (первоначального) положения в режиме реального времени. Основными входными информационными параметрами для системы мониторинга деформации несущего каркаса являются углы наклона ключевых конструкций каркаса – монолитных колонн в двух ортогональных вертикальных плоскостях X и Y (рис. 2).

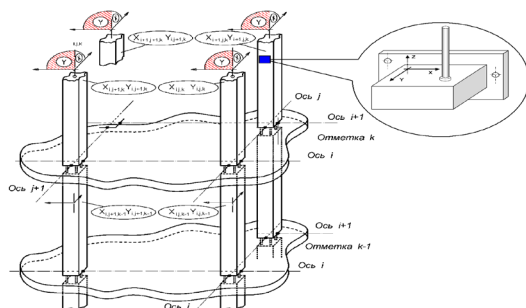


Рисунок 2. Схема привязки индексов инклинометров и углов наклона колонн к осям здания

Анализ деформации каркаса базируется на разработанной методике, основанной на сопоставлении коэффициентов взаимной

240

Аналогичным образом можно составить схему корреляционных связей для случаев наклона всего каркаса здания и для более сложных видов деформации каркаса, например, деформации кручения каркаса в горизонтальной плоскости (рис. 5).

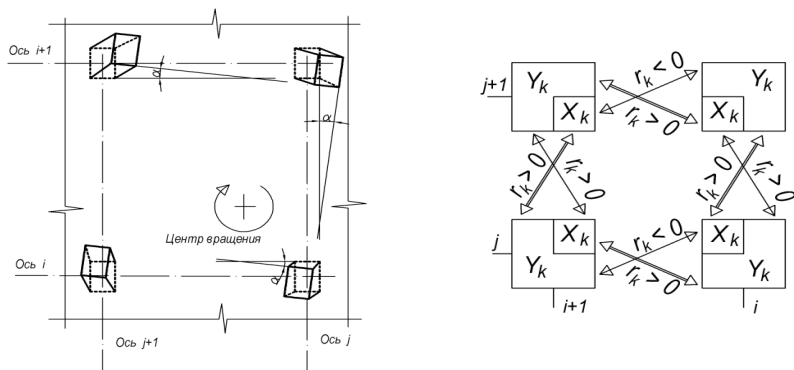


Рисунок 5. Схема деформации кручения фрагмента несущего каркаса здания

Визуализацию деформационных изменений несущего каркаса здания удобно осуществлять посредством построения годографов угловых перемещений колонн в полярных координатах, связанных к координатной сетке здания (рис. 6).

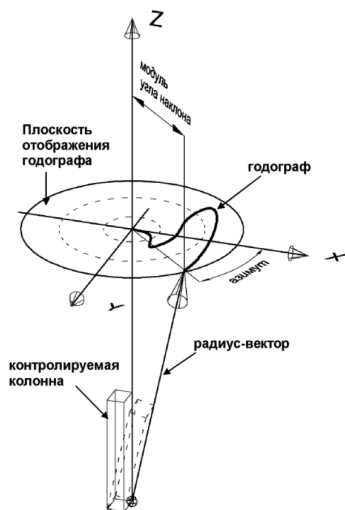


Рисунок 6. Схема отображения данных угловых отклонений колонн здания

Угловая координата (азимут) ang годографа рассчитывается по формуле

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

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

Расчет модулей mod углов производился по формуле

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

На рисунке 7 приведен годограф перемещений одного из сенсоров 21-го 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...0,031 углового градуса.

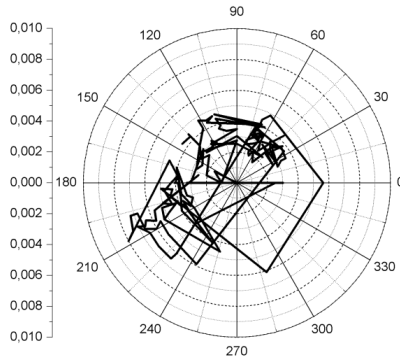


Рисунок 7. Годограф наклона колонны 21-го этажа здания за период 2017–2018 годов

Значимая корреляция средних значений угла наклона колонн по этажам не выявлена, что косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком.

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 1 приведены значения межэтажных коэффициентов взаимной корреляции средних значений модулей наклона и средних значений азимутов наклона колонн. Данные таблицы 1

указывают на значимую – $r = 0,7...0,86$ взаимную корреляцию среднего значения модулей углов наклона колонн этажей, что, вероятно, обусловлено общей причиной вариации модулей углов наклона. В то же время корреляция азимутальных углов практически отсутствует. Это косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции средних по этажам модулей векторов наклона колонн

Этаж	Коэффициент корреляции mod годографов	Коэффициент корреляции азимутов годографов
21-й этаж – 7-й этаж	0,71	0,06
21-й этаж – подвал	0,86	-0,04
7-й этаж – подвал	0,85	0,26

Годографы векторов деформации отдельных колонн (рис. 7) 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 рисунке 8 показаны совместные диаграммы изменений модуля угла наклона одной из колонн и температуры.

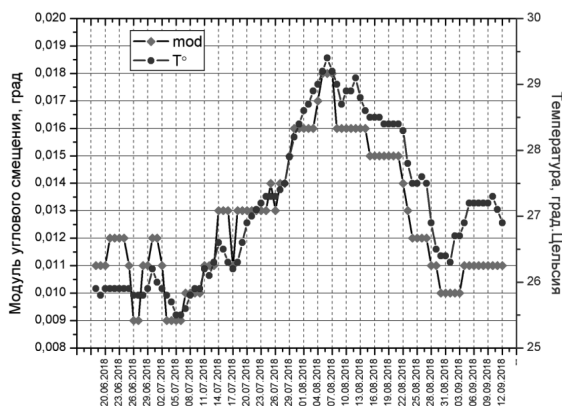


Рисунок 8. Совместные временные диаграммы угловых смещений сенсора подвала и температуры за период июнь-сентябрь 2018 года

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.

Для датчиков высотной части здания устойчивое и близкое к 1 значение коэффициента корреляции наблюдалось в интервале температур +16 °...+26 °С (рис. 9) [3].

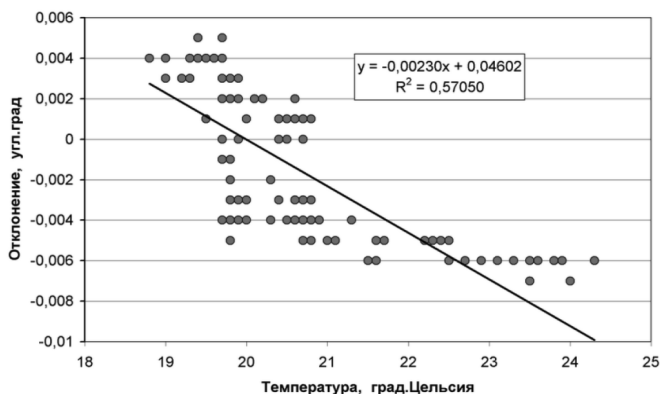


Рисунок 9. Зависимость Y-составляющей наклона колонны 21-го этажа от температуры: период наблюдения – март-июнь 2018 года

Чувствительность углов наклона X , Y колонны к изменению температуры t определяется коэффициентом регрессии A_1 в соответствующих уравнениях:

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

Как показал анализ данных мониторинга за более чем 2-летний период наблюдения объекта, коэффициенты регрессии A_1 не являются постоянными величинами. Наибольшие их изменения связаны с периодом монтажа технологического оборудования,

также с запуском системы отопления и кондиционирования воздуха. Кроме того, наблюдался эффект, связанный с температурной инерционностью строительных конструкций: максимального значения коэффициент корреляции углов наклона колонн и температуры достигал не для текущих значений температуры, а для ее значений, зарегистрированных примерно 1...1,5 сутками ранее. Учет тепловой инерции конструкций здания позволил несколько повысить точность определения температурной поправки. Характеристическое время задержки Δt деформационной реакции от момента температурного перепада составило для сенсоров системы около 20...28 часов. Критерием для определения характеристического времени задержки Δt являлось достижение максимального значения коэффициента корреляции $r_{X,t}$

$$r_{X,t}[X(T_i); t(T_i - \Delta t)] \rightarrow \max, \quad (4)$$

где T_i – текущее время регистрации угла наклона.

Уточненные значения углов наклона X^* и Y^* рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} X_i^* &= X_i + A_{1,X}(t_0 - t_{i-1}), \\ Y_i^* &= Y_i + A_{1,Y}(t_0 - t_{i-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

где t_0 – приведенное значение температуры (принималось +15 °С); t – текущее значение температуры; i – текущая дата наблюдения.

На рисунке 10 приведены временные диаграммы для коэффициентов регрессии $A_{1,X}$ и $A_{1,Y}$ для одного из сенсоров 21-го этажа.

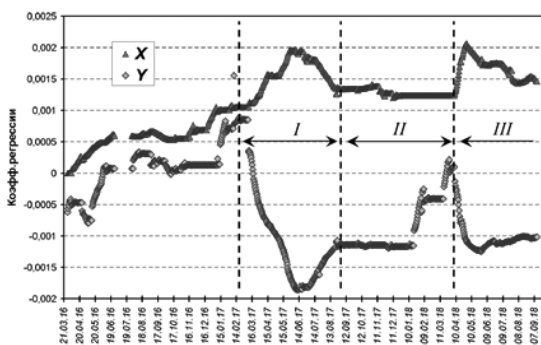
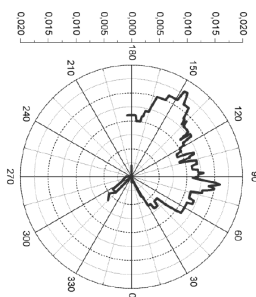


Рисунок 10. Зависимость X и Y-составляющей наклона колонны 21-го этажа от температуры: I, II и III периоды наблюдения

На диаграммах выделены три характерных периода: период I – введение объекта в эксплуатацию и эксплуатация объекта без включения системы отопления; период II – октябрь 2017 г. по март 2018 г. – эксплуатация объекта с включенной системой отопления, период III – с конца марта 2018 г. – с выключенной системой отопления. Коэффициенты регрессии рассчитывались по методу скользящего среднего, длительность усредняющего периода наблюдения принималась равной 12 суткам. На рисунке 11 приведены годографы наклона одной из колонн 21-го этажа.

а)



б)

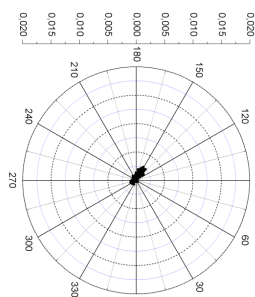


Рисунок 11. Годографы наклона колонны подвала здания:

а – без температурной коррекции; б – с температурной коррекцией.

Область вариации годографа после введения температурной поправки сократилась примерно в пять раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. 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.
2. В качестве методической основы обработки данных системы предлагается корреляционный анализ приращений углов наклона ключевых конструкций.

3. 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.
4. За период наблюдения эксплуатируемого здания с марта 2017 года по март 2018 года температурный фактор определял 30...80 % 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 ее 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, особенно на начальной стадии эксплуатации системы.
5. Вариация температурной чувствительности (коэффициентов регрессии) углов наклона контролируемых колонн составила 0...0,002 угл.град/°С; проявилось заметное влияние на указанные коэффициенты сезонного фактора. Связь температурной чувствительности с текущим значением температуры не обнаружена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. – 2009. – № 1(71). – С. 3–6.
2. Минченя, В. Т. Информационные технологии в строительстве / В. Т. Минченя [и др.] // «Актуальные

проблемы инновационной подготовки инж. кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты»: Межд. научно-технич. конф. – Минск, БНТУ, 2015. – 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.

Статья поступила: 10.11.2018

REFERENCES

1. Guryev V. V., Dorofeev V. M., Katrenko V. G. *Stroyprofil*. 2009. No 1(71). Pp. 3–6. (rus)
2. Minchenya V. T. *Informatsionnyye tekhnologii v stroitelstve* [Information technologies in construction] Articles of the International scientific and technical conference “Actual problems of innovative training of ing. personnel in the transition of the construction industry to European standards”. Minsk: BNTU, 2015. Pp. 174–180. (rus)
3. Snezhkov D. Yu. *Osnovy monitoringa vozvodimyykh i ekspluatiruyemykh zhelezobetonnykh konstruktsiy nerazrushayushchimi metodami* [Monitoring Framework constructed and operated reinforced concrete structures by nondestructive methods]. Minsk: BNTU, 2016. 330 p. (rus)
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.

Received: 10.11.2018