

DOI.org/10.5281/zenodo.2008666
УДК 624.07: 69.058.2

Д.Ю. Снежков

СНЕЖКОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент кафедры технологии строительного производства, e-mail: snezhkov-d-u@yandex.ru

Белорусский национальный технический университет

Независимости пр-т, 65, Минск, Республика Беларусь, 220013

Автоматизированный мониторинг элементов несущего каркаса высотного здания: учет температурного фактора

Аннотация: Для обеспечения необходимого уровня безопасности как на стадии строительства, так и в период эксплуатации здания важную роль приобретают системы автоматизированного мониторинга деформационного состояния несущих конструкций здания. Система осуществляет раннюю диагностику изменений напряженно-деформированного состояния конструкций и локализацию мест такого изменения.

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 и с малыми издержками организовать информационно-измерительную мониторинговую сеть, а при необходимости – изменить её конфигурацию. В качестве основы обработки данных мониторинга предлагается корреляционный анализ углов наклона колонн каркаса здания.

Приведены данные мониторинга высотного здания в г. Минске. Выявлена значимая корреляция углов наклона монолитных колонн здания и температуры. Предложена авторская методика введения поправки для компенсации температурного фактора деформации.

Ключевые слова: инклинометр, несущий каркас, угловое отклонение, деформация, годограф.

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, обладающие высокой чувствительностью к 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 течение последних 5 лет позволяет сформулировать некоторые общие для всех систем ключе-

вые вопросы, требующие решения как на стадии проектирования и монтажа системы автоматизированного мониторинга, так и в период ее эксплуатации.

Состояние вопроса

Первая задача, с которой сталкивается проектировщик системы автоматизированного мониторинга – сокращение перечня контролируемых параметров, в значительной мере определяющего ее стоимость. Снабжать каждый элемент силового каркаса здания всем перечнем сенсоров не представляется целесообразным не только из-за увеличения стоимости системы, но и по причине информационной избыточности получаемого потока данных. Показания большей части сенсоров будут либо дублировать друг друга, либо иметь сильную взаимную корреляцию, обусловленную пространственной связанностью элементов несущего каркаса здания, 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, 4], 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 торговоразвлекательный комплекс с гостиницей и паркингом на проспекте Победителей в г. Минске» (см. рис. 1). Комплекс представляет собой 21-этажное здание, состоящее из двух основных частей: шестизэтажной стилобатной части (торгового центра) и 14-этажной гостиницы. Верхняя отметка здания: +85,650 м. 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.

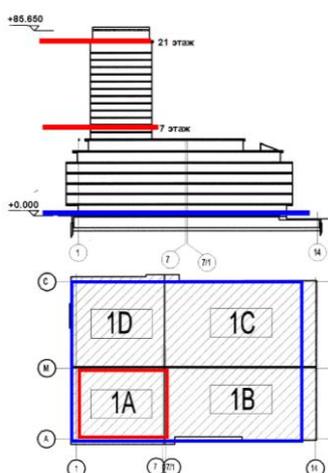


Рис. 1. Общий план объекта и периметров монтажа сенсоров.

Компактность конструкции используемой модели инклинометров в совокупности с беспроводным интерфейсом позволяют легко их устанавливать на элементах каркаса зданий, находящихся в эксплуатации, а при необходимости – менять места установки.

Другой важный вопрос, возникающий в начале эксплуатации системы автоматизированного мониторинга, – выбор алгоритма распознавания предаварийной ситуации объекта и формирования так называемого *alarm*-сигнала. 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 предельного углового отклонения всего здания в целом. Для расстояния от верха фундамента до верха несущих конструкций покрытия h угловое отклонение не должно превышать:

- 1/500 при h до 150 м,
- 1/600 для h до 200 м,

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

Наиболее информативными показателями исчерпания несущей способности элемента конструкции являются напряжения в нем [2]. Фактически же контролируются показатели деформации, что создает определенную проблему в распознавании предаварийной ситуации. Изменение углов наклона контролируемой конструкции может быть обусловлено разными факторами. Очевидно, что для одного и того же приращения угла наклона приращения внутренних напряжений в конструкции могут оказаться различными, в зависимости от причин, вызвавших деформацию. Изменение вектора нагрузки не эквивалентно изменениям упруго-прочностных свойств материала конструкции. А оба этих фактора не могут рассматриваться как равнозначные температурному расширению-сжатию железобетона. Это обстоятельство должно учитываться алгоритмом распознавания предаварийной ситуации объекта. В рассматриваемой системе мониторинга температура конструкций принимается во внимание.

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 Internet. Контроль угловых отклонений колонн несущего кар-

каса производится сенсорами-инклинометрами имеющими беспроводный интерфейс, установленными на колоннах подвального этажа стилобатной части, на 7 и 21 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 сут, 1 ч и 15 мин. Типовое расположение сенсоров – инклинометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания (см. 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.

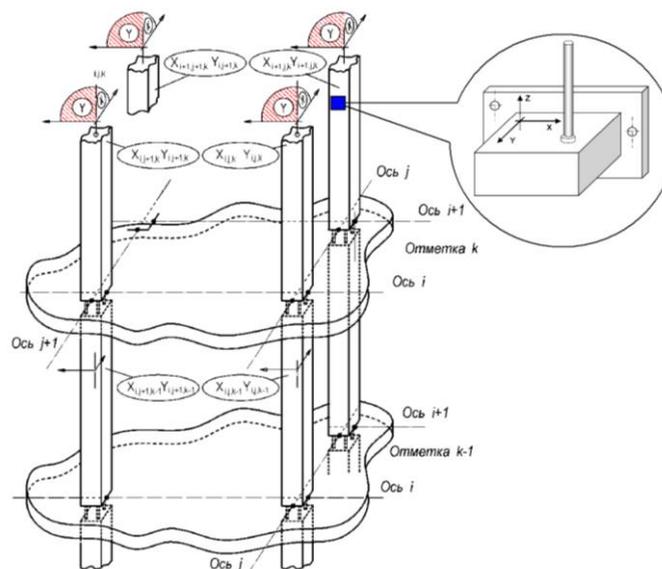


Рис. 2. Схема привязки индексов инклинометров и углов наклона колонн к осям здания.

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). Анализ деформации каркаса базируется на методике, основанной на сопоставлении коэффициентов взаимной корреляции углов наклона угловых колонн. Конструктивная схема здания обуславливает сильную механическую связанность элементов каркаса в пределах каждого этажа и, соответственно, – взаимную зависимость деформации элементов (см. рис. 2), которая будет проявлять себя значимыми величинами коэффициентов взаимной корреляции углов наклона контролируемых колонн.

Некоторые из наиболее вероятных деформационных изменений несущего каркаса представлены на рисунках 3–5. Для всех приведенных схем факт деформации каркаса может быть зарегистрирован по изменению углов наклона контролируемых колонн, а конкретный вид де-

формации – по показателям корреляционных связей углов наклона. Рисунок 3 отображает связь наклона колонн каркаса с прогибом диска перекрытия.

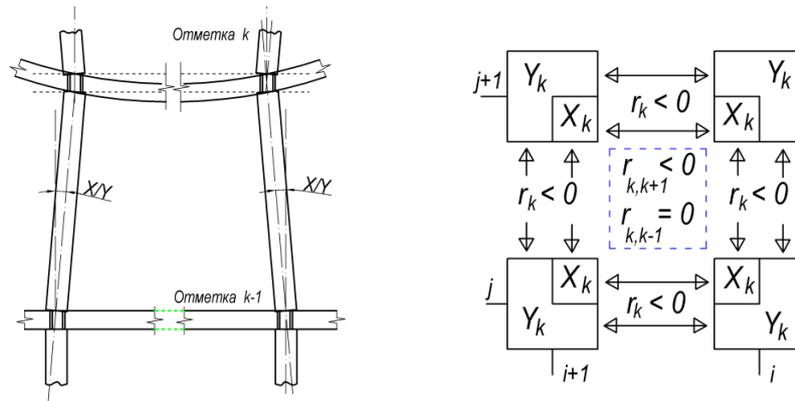


Рис. 3. Схемы деформации диска перекрытия и колонн несущего каркаса здания (слева); соотношения коэффициентов корреляции углов наклона колонн (справа).

На рис. 4 показана деформация горизонтального сдвига каркаса в пределах одного этажа здания: изменяются углы наклона колонн одного этажа, колонны, смежные по высоте с контролируруемыми, сохраняют свое угловое положение.

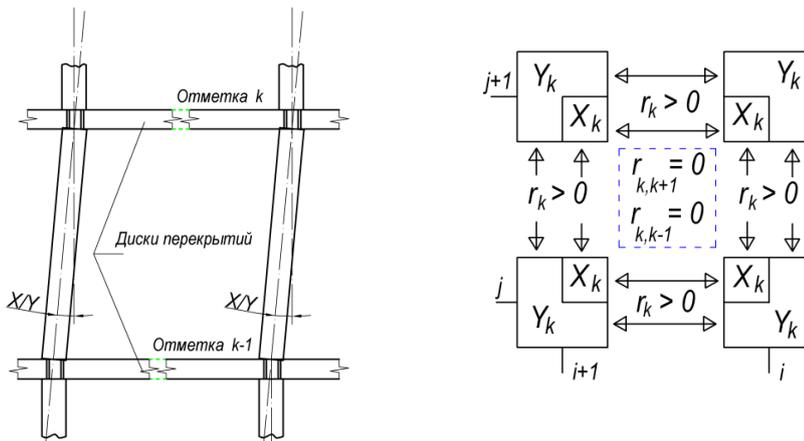


Рис. 4. Схемы деформации горизонтального сдвига диска перекрытия (слева).

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).

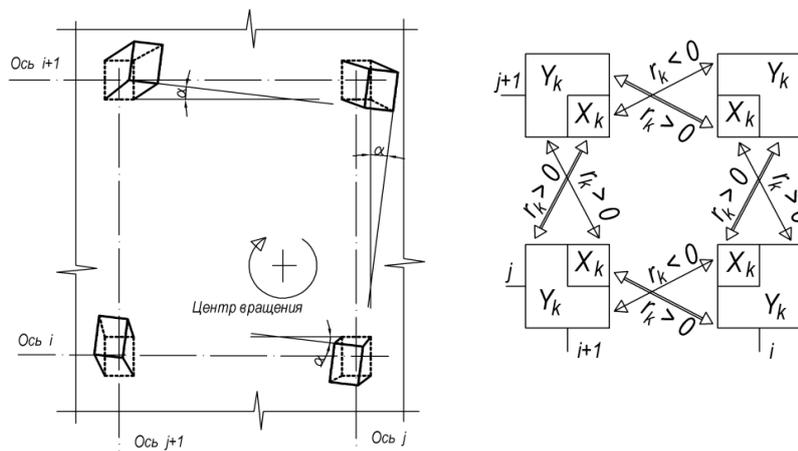


Рис. 5. Схема деформации кручения фрагмента несущего каркаса здания.

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

$$mod = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2} \quad (2)$$

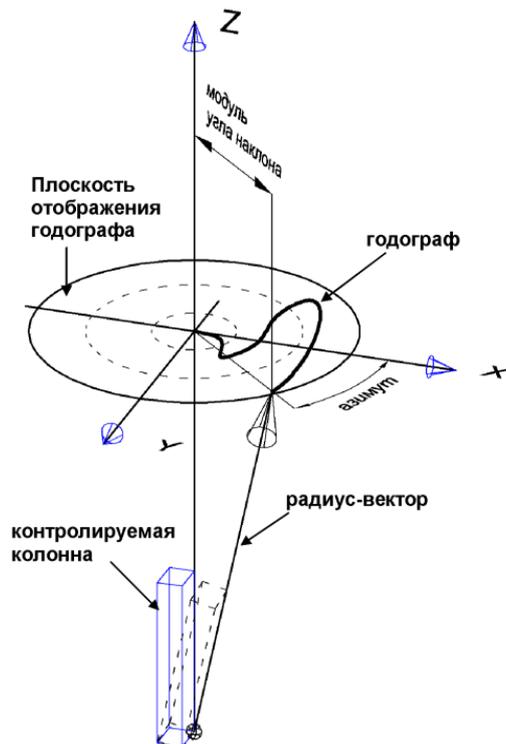


Рис. 6. Схема отображения данных угловых отклонений колонн здания.

За период наблюдений (19.08.2015 – 13.03.2018) средняя величина модуля угловых перемещений колонн по этажам составила 0,007...0,031 углового градуса. На рис. 7 приведен годограф перемещений одного из сенсоров 21 этажа в плоскости осей X, Y .

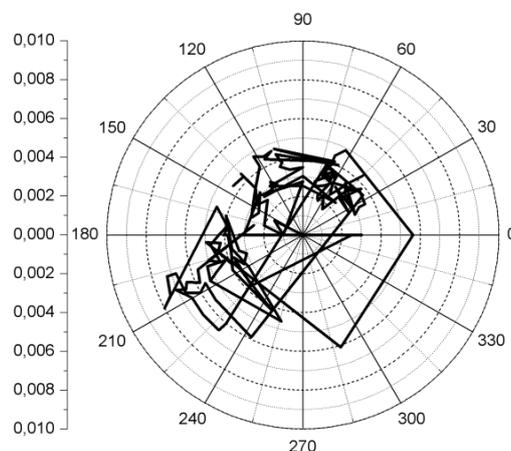


Рис. 7. Годограф наклона колонны 21 этажа здания за период 2017–2018 гг.

Значимой корреляции средних значений угла наклона колонн по этажам не выявлено, 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, также 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.

Коэффициенты корреляции средних по этажам модулей векторов наклона колонн

Этажи	Коэффициент корреляции <i>mod</i> годографов	Коэффициент корреляции азимутов годографов
21–7	0,71	0,06
21–подвал	0,86	–0,04
7–подвал	0,85	0,26

Данные таблицы указывают на значимую ($r = 0,7 \dots 0,86$) 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. Годографы векторов деформации отдельных колонн (см. 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. Сопоставление параметров угловых перемещений и температуры колонн позволило выявить их значимую корреляцию. На рис. 8 показаны совместные диаграммы изменений модуля угла наклона одной из колонн и температуры. 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 автором методика компенсации температурного фактора базируется на расчете и введении температурной поправки для каждой из ортогональных составляющих угла наклона колонны.

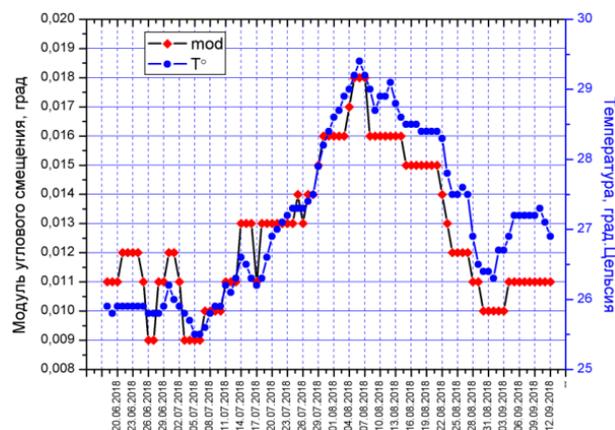


Рис. 8. Совместные временные диаграммы угловых смещений сенсора подвала и температуры за период июнь 2018 г. – сентябрь 2018 г.

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. 9) [3].

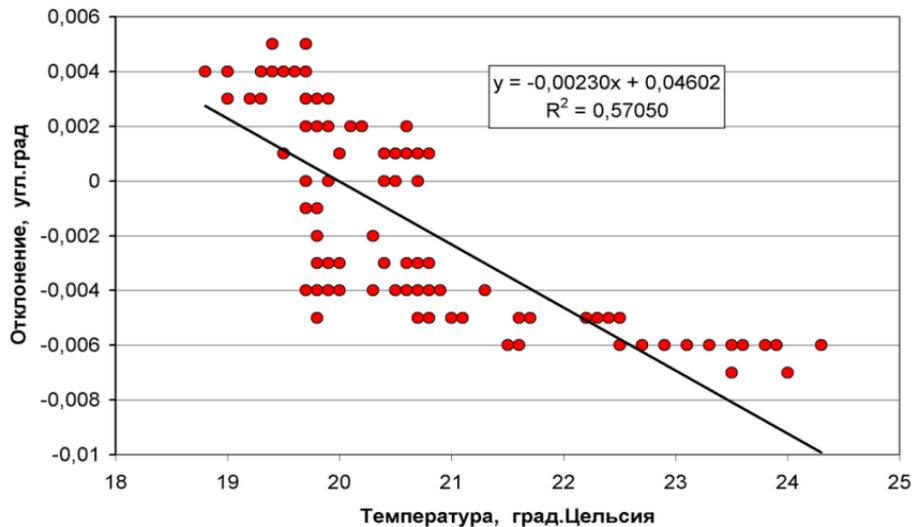


Рис. 9. Зависимость Y-составляющей наклона колонны 21 этажа от температуры: период наблюдения март 2018 г. – июнь 2018 г.

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 двухлетний период наблюдения объекта, коэффициенты регрессии A_1 не являются постоянными величинами. Наибольшие их изменения связаны с периодом монтажа технологического оборудования, а также с сезонными запусками и отключениями системы отопления и кондиционирования воздуха. Кроме того, наблюдался эффект, обусловленный температурной инерционностью строительных конструкций: максимального значения коэффициент корреляции углов наклона колонн и температуры достигался не для текущих значений температуры, а для её значений, зарегистрированных примерно 1...1,5 сутками ранее. 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.

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

На диаграммах выделены три характерных периода: I – введение объекта в эксплуатацию и эксплуатация объекта без включения системы отопления; II – октябрь 2017 г. по март 2018 г. – эксплуатация объекта с включенной системой отопления; 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 рис. 11 приведены годографы наклона одной из колонн 21 этажа. Область вариации годографа после введении температурной поправки сократилась примерно в пять раз.

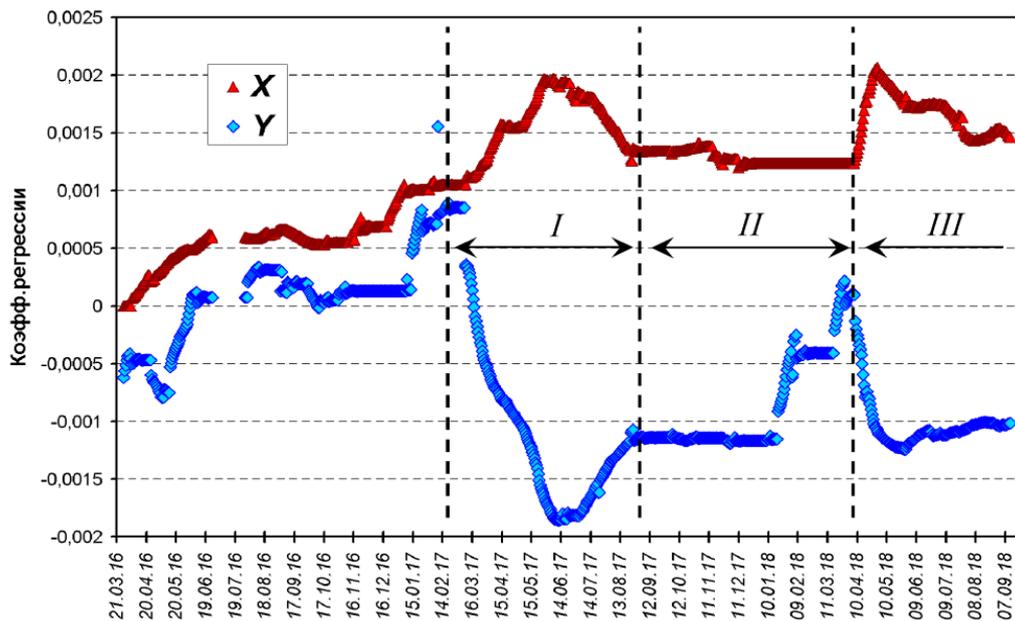


Рис. 10. Зависимость X и Y-составляющих наклона колонны 21 этажа от температуры: I, II и III – периоды наблюдения.

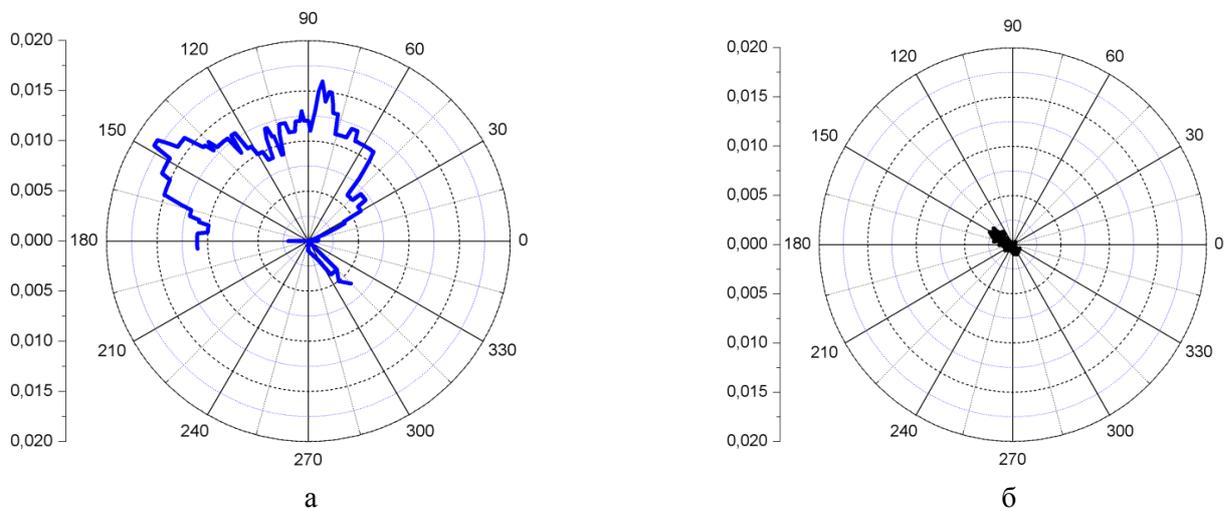


Рис. 11. Годографы наклона колонны подвала здания: а – без температурной коррекции; б – с температурной коррекцией.

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.

Выявлено сильное влияние на показатели деформации несущего каркаса здания вариации температуры. Угловые отклонения колонн за счет температурного фактора имеют обра-

тимый характер. Значительное влияние на величины температурных составляющих деформации оказывает режим работы системы кондиционирования-отопления здания.

За период наблюдения эксплуатируемого здания с марта 2017 г. по март 2018 г. 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 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, особенно на начальной стадии эксплуатации системы.

Вариация температурной чувствительности (коэффициентов регрессии) углов наклона контролируемых колонн составила 0...0,002 угл. град/°С. Связь температурной чувствительности с температурой не обнаружена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев В.В., Дорофеев В.М., Катренко В.Г. и др. Автоматизированные станции мониторинга деформационного состояния (СМДС) и их применение на строительных объектах // Строй-профиль. 2009. № 1 (71). С. 3–6.
2. Минченя В.Т., Асимов Р.М., Тромпель Д.А. и др. Информационные технологии в строительстве // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты: сб. ст. междунар. науч.-тех. конф. Минск: БНТУ, 2015. С. 174–180.
3. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами. 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, p. 378–385.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

Buildings and Structures

DOI.org/10.5281/zenodo.2008666

Snezhkov D.

DMITRY SNEZHKOVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Construction Technology Department, e-mail: snezhkov-d-u@yandex.ru
Belarussian National Technical University
 65 Independence Ave., Minsk, Republic of Belarus, 220013

The automated health monitoring of load-bearing frame elements high-rise building: taking into account the temperature factor

Abstract: To ensure the required level of safety, both at the construction stage and during the building operation period, the systems for automated long-term structural health monitoring acquire an important role. The system provides early diagnosis of changes in the stress-strain state of structures and localization of such changes.

In the article the questions of the automated structural health monitoring of high-rise buildings of high-rise buildings using tilt angle sensors – inclinometers. Indicators of sensitivity and long-term stability of the metrological characteristics of inclinometers make it possible to register almost any deformation changes in the geometry of the building's supporting frame, including those due to temperature variation. High sensitivity in combination with the wireless interface allows you to quickly and cost-effectively organize the information-measuring monitoring network, and if necessary – to change its configuration. As a basis for processing the monitoring data, a correlation analysis of the angles of the building framework columns inclination is proposed.

The correlation analysis of the inclination angles of the columns of the building frame is proposed as a basis for processing the monitoring data.

The monitoring data of a high-rise building in Minsk are given. Revealed a significant correlation the angles of monolithic columns inclination of the building and temperature. The author's method of introducing an amendment to compensate for the temperature deformation factor is proposed.

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

REFERENCES

1. Guryev V.V., Dorofeev V.M., Katrenko V.G. et al. Automated station of monitoring of stress-strain state (USCIB) and their application at construction sites. *Stroyprofil*. 2009;1:3–6.
2. Minchenya V.T., Asimov R.M., Trompel D.A. et al. 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*. 2015, Minsk, BNTU, p. 174–180.
3. Snezhkov D.U., Leonovich S.N. Monitoring framework constructed and operated reinforced concrete structures by nondestructive methods. Minsk: BNTU, 2016. 330 p.
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, p. 378–385.