

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Введение. По действующим в Республике Беларусь нормативам [1, 2] для всех проектируемых в Республике высотных зданий «... необходимо предусматривать научно-техническое сопровождение, включающее комплекс мероприятий, в том числе геотехнический мониторинг, мониторинг состояния несущих конструкций и фасадных систем, необходимые испытания конструкций и материалов, аэродинамические испытания и др.». В связи с этим важную роль приобретают системы автоматизированного мониторинга деформационным состоянием несущих конструкций здания.

Назначением информационно-измерительной системы автоматизированного мониторинга является снижение риска аварийной ситуации на основе ранней диагностики изменений напряженно-деформированного состояния конструкций и локализации мест такого изменения. При этом очевидно, что контроль деформационного состояния несущих конструкций должен носить систематический и долговременный характер - в течение всего периода эксплуатации здания.

Структурно в системе автоматизированного мониторинга можно выделить два уровня:

- **технический**, в который входит собственно система сбора информации с сенсорными элементами, физическим интерфейсом объединения сенсоров в информационную сеть, центральным сервером под управлением программного пакета SCADA (*supervisory control and data acquisition*) для сбора, архивации, долговременного хранения информации и обеспечения доступа к ней ответственных лиц;
- **уровень принятия решений**, ядром которого является алгоритм распознавания приближения аварийной ситуации по совокупности фактических значений полученных от сенсоров параметров деформации контролируемых элементов.

Типичными контролируруемыми параметрами являются величины линейной деформации контролируемых конструкций, их углы наклона и колебательное ускорение. Дополнительно могут устанавливаться сенсоры скорости и направления ветра, сенсоры температуры, а также датчики акустической эмиссии.

Идеальным было бы снабдить каждый элемент силового каркаса здания всем перечнем сенсоров. В реальности, конструктору приходится руководствоваться принципом разумной достаточности, принимая в рассмотрение конструктивную схему здания, характеристики грунта, диапазон рабочих нагрузок, вероятные техногенные и прочие факторы, а также характер использования помещений. Установка датчиков линейной деформации, независимо от физического принципа их работы, требует достаточно протяженной базы, на которой производится регистрация взаимного перемещения контрольных точек конструкции. Но это может быть неприемлемым по архитектурным или эстетическим соображениям. Один из «эконом-вариантов» в выборе системы сенсоров деформаций может быть основан на использовании датчиков угловых перемещений – так называемых инклинометров.

Деформационные модели несущего каркаса здания. Компромиссным решением задачи определения деформации несущего каркаса является использование в качестве информационных параметров углов наклона нескольких ключевых конструкций каркаса с помощью датчиков угловых перемещений – инклинометров. Выбор ключевых контролируемых конструкций и количество устанавливаемых сенсоров должен производиться на основе анализа вероятностных моделей деформации каркаса, что является нетривиальной задачей, зависящей от конкретного конструктивного исполнения здания, эволюции упруго-прочностных характеристик конструкций

ных материалов, характеристик грунтов и внешних воздействий. Ясной, однозначной регламентации этого вопроса действующими нормативами нет.

Типичные образцы инклинометров обеспечивают измерение углов своего наклона в двух ортогональных вертикальных плоскостях X и Y (рис. 1). Система установки инклинометров должна обеспечивать максимальную информативность, позволяя регистрировать наиболее вероятные изменения геометрии несущего каркаса здания. С таких позиций наиболее эффективными местами установки инклинометров являются несущие колонны в осях по периметру дисков перекрытий монолитного каркаса. Для прямоугольных в плане зданий целесообразно устанавливать инклинометры на угловых колоннах.

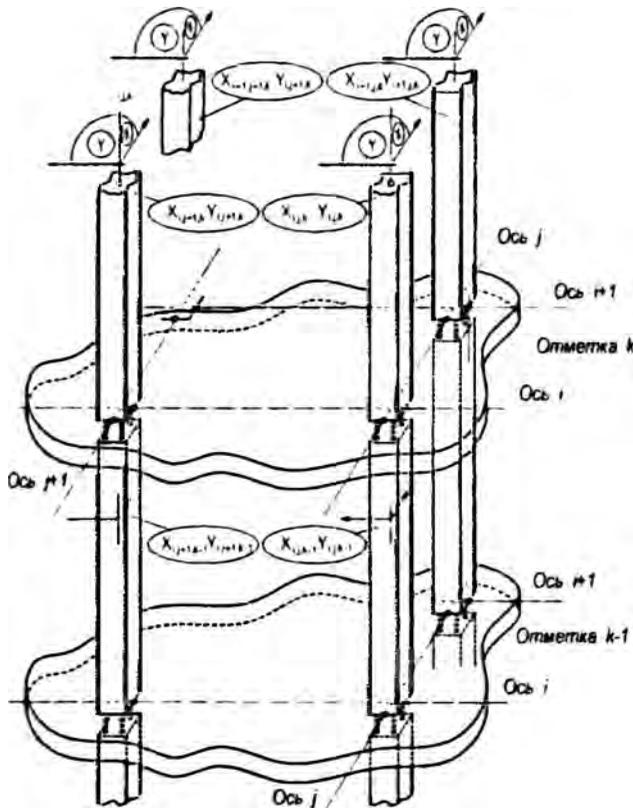


Рисунок 1 – Схема привязки индексов инклинометров и углов наклона колонн к осям здания

В основу методики обработки данных инклинометров - с целью установления связи между величинами деформаций здания, а также возможными причинами их возникновения - может быть положен корреляционный анализ [3]. Предварительное суждение о корреляционной связи можно делать на основе изучения графика, по одной оси которого откладывают величины деформаций, а по другой - величины, характеризующие изменения того или иного фактора (рост нагрузки на основание фундамента, колебание уровня грунтовых вод, изменение температуры и т. д.). Количественно степень связи определяется коэффициентом корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (1)$$

где x_m и y_m – средние значения величин x и y ; n – число отсчетов (наблюдений); σ_x и σ_y – средние квадратические отклонения величин x и y .

Для оценки надежности коэффициента корреляции при $n < 50$ рекомендуется использовать критерий Фишера. При $n > 50$ среднее

квадратическое отклонение коэффициента корреляции рекомендуется определять по формуле

$$\sigma(r) = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Связь между величинами x и y является установленной, если выполняется условие

$$r \geq 3\sigma(r).$$

Наиболее вероятные деформационные изменения несущего каркаса представлены на рис. 2 и рис. 3. На рис. 2 отображена деформация кручения каркаса. Характерным для такого типа деформации является взаимная корреляция углов в ортогональных плоскостях X и Y (рис. 2,б).

На рис. 3,в отображен наклон всего каркаса здания: углы наклона смежных по высоте колонн одинаковы. Схемы корреляционных связей в пределах одного этажа по рис. 3,б и рис. 3,в совпадают. Отличие рис. 3,в состоит в появлении корреляции углов наклона колонн k -го этажа с с углами колонн $k+1$ или $k-1$ этажей. Ориентация осей колонн и наименования углов наклона на рис. 2, рис. 3 выполнены в соответствии с рис. 1.

Для всех приведенных схем факт деформации каркаса может быть зарегистрирован по изменению углов наклона контролируемых колонн, а конкретный вид деформации – по показателям корреляционных связей углов наклона. На рис. 3,б показана деформация сдвига каркаса в пределах одного этажа здания: изменяются углы наклона колонн одного этажа, колонны смежные по высоте с контролируемыми сохраняют свое угловое положение.

В случае плоскопараллельного вертикального смещения колонн угловое положение колонн сохраняется неизменным. Такое событие может иметь место при неравном распределении нагрузки на несущий каркас, либо – в случае подвижки фундамента здания. Регистрация такой деформации возможна инклинометром, установленным на одном из дисков перекрытий.

Реальная картина деформирования несущего каркаса здания может представлять комбинацию приведенных на рис. 2 ... рис. 3 вариантов. Соответственно, схеме корреляционных связей контролируемых углов будет суперпозиция рассмотренных выше составляющих.

Один из первых вопросов, которые возникают в начале эксплуатации системы автоматизированного мониторинга, – о предельных значениях контролируемых параметров.

Нормативы дают лишь общие рекомендации (где h – расстояние от верха фундамента до верха несущих конструкций покрытия) не должны превышать:

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

При высоте h от 150 до 200 м значения предельных горизонтальных перемещений следует определять по интерполяции. Какими могут быть отклонения показателей отдельных элементов или конструкций решать придется проектировщику. 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 упруго-деформативных и прочностных параметрах, позволит по изменению состояния группы контролируемых элементов рассчитать состояние остальных. Соответственно можно решать и обратную задачу – выбрать «ключевые» элементы, наиболее чувствительные к вероятным деформациям каркаса.

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;

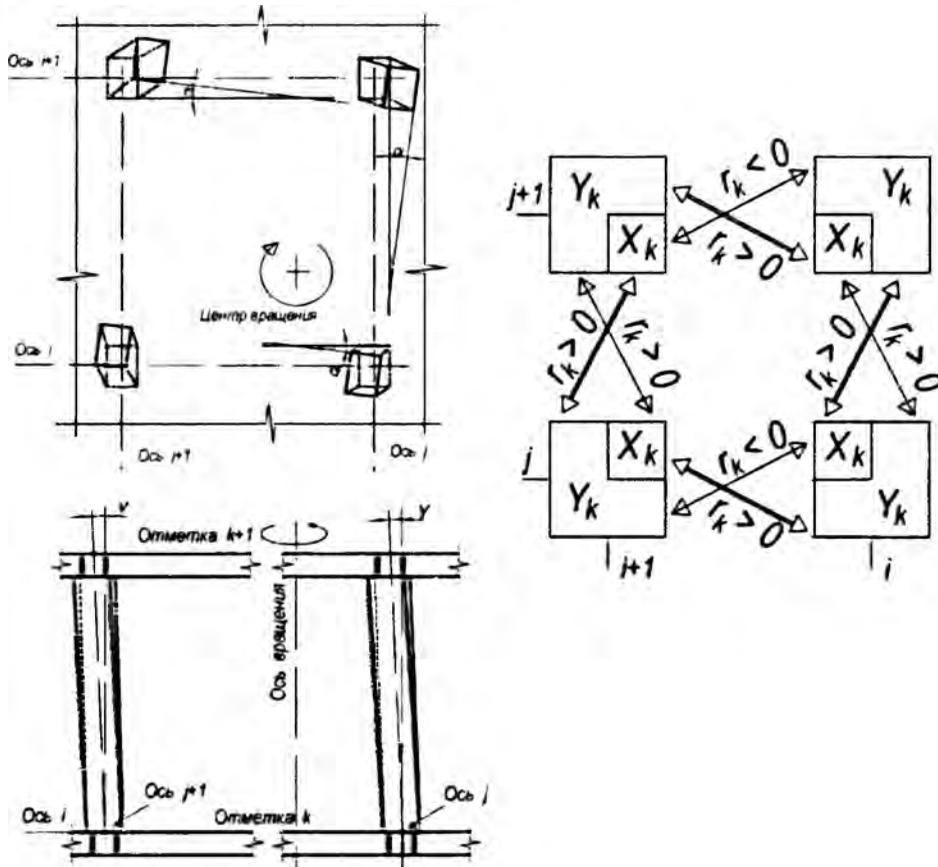


Рисунок 2 – Схема деформации кручения фрагмента несущего каркаса здания (а); соотношения коэффициентов корреляции углов наклона колонн (б)

- 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. К настоящему времени в нашей стране уже накоплен некоторый опыт эксплуатации систем автоматизированного мониторинга зданий. Ниже рассматривается система «АККЕ» производства компании «Tieto-Oskari Oy» (Финляндия,) которой оснащено высотное здание с монолитным железобетонным каркасом (рис. 4) - «Современный многофункциональный торгово-развлекательный комплекс с гостиницей и паркингом на проспекте Победителей в г. Минске». Комплекс является сложным объектом, представляет собой 21-этажное здание, состоящее из двух основных частей: 6-этажной 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. Такая конструктивная схема обуславливает сильную связанность элементов каркаса в пределах каждого этажа и взаимную зависимость деформации элементов, а это, в свою очередь, позволяет минимизировать число точек контроля и ограничиться измерениями углов.

Основными аппаратными элементами 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 геометрических отклонений несущего каркаса производится сенсорами-инклинометрами имею-

ми беспроводный интерфейс, установленными в подвальном этаже и на 7 и 21 этажах на колоннах здания. Дополнительно на кровле были установлены проводные сенсор скорости и направления ветра и сенсор-акселерометр. Кроме датчика угловых перемещений каждый сенсор-инклинометр имеет в своем составе датчик температуры с разрешением 0,1°C. Обработка сигналов сенсоров происходит в режиме реального времени в центральном базовом блоке системы.

Основные параметры сенсоров-инклинометров приведены в таблице 1. Базовый блок может работать в автономном режиме, получая информацию от всех сенсоров и 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 предусматривается организация массива накопленных данных сенсоров-инклинометров в виде трех файлов, содержащих отсчеты данных с разрешением в 1 сутки, 1 час и 10 минут. Размер каждого файла ограничен ~250 записями, каждая из которых является результатом усреднения отсчетов сенсоров за соответствующий интервал времени.

Таблица 1 – Основные технические характеристики инклинометра CMS-2D-R

Наименование характеристики	Значение
Количество осей (каналов) измерения	2
Тип подключения	радио
Полный измеряемый диапазон	±15°
Разрешающая способность, аналоговая	0,001° (3,6")
Абсолютная погрешность	±1,8"
Диапазон измеряемых температур встроенным датчиком, °C	от - 60 до + 125

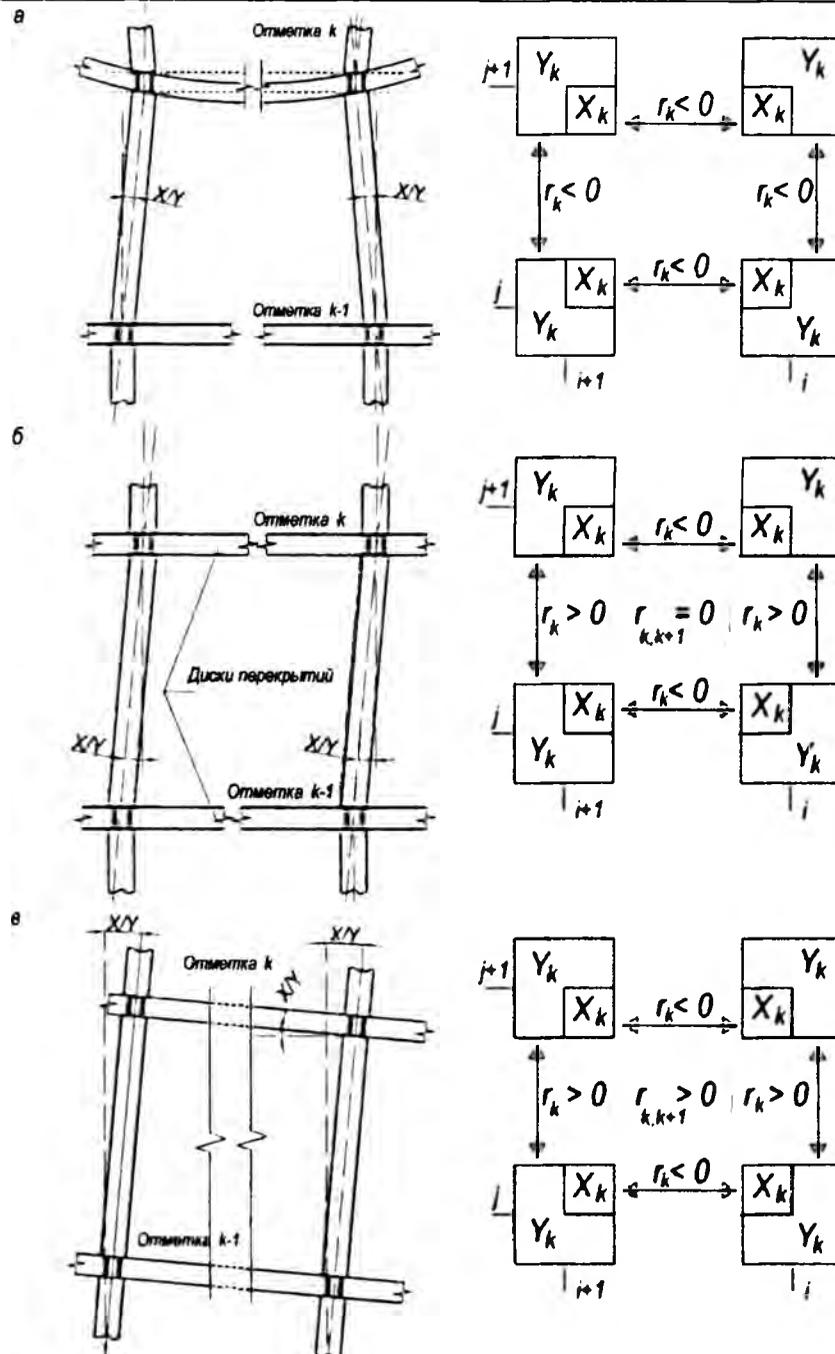
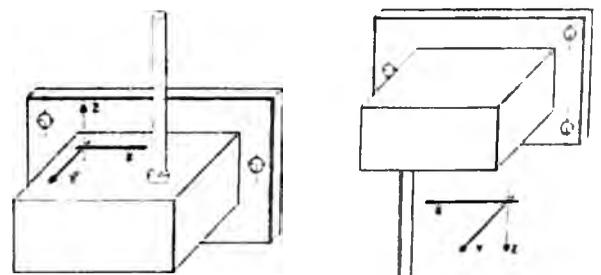


Рисунок 3 – Схемы деформации фрагментов несущего каркаса здания (слева); соотношения коэффициентов корреляции углов наклона колонн (справа)



а)



б)

а – сенсор с беспроводным интерфейсом; б – варианты пространственной ориентации сенсора

Рисунок 4 – Сенсор – инклинометр

Типовое расположение сенсоров-инклинометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания. Схемотехническое исполнение инклинометров и базового блока позволяет их дистанционное конфигурирование: установку параметров чувствительности сенсоров, их начальное – нулевое значение отсчетов, период опроса, параметры конфигурирования информационной сети и др.

Рабочее положение сенсоров – горизонтальное (рис. 5), длинная сторона крепежного фланца должна быть горизонтальна, а плоскость крепежного фланца – вертикальна. Крепление сенсора к несущим конструкциям (колоннам) производится на расстоянии не менее 30 см от перекрытия. После установки сенсоры-инклинометры на контролируемые элементы каркаса здания имеют разную взаимную ориентацию. В результате чего координатные оси инклинометров могут не совпадать. Поэтому важное значение имеет учет пространственной ориентации сенсора-инклинометра относительно выбранной системы координат (рис. 5,б): вращение сенсора в плоскости крепежного фланца (оси X-Z) не влияет на отсчет угла поворота в этой плоскости, но для угла в плоскости Y-Z необходимо учитывать смену знака.

Технические результаты мониторинга. В основе мониторинга конструкций лежит принцип регистрации угловых отклонений сенсора от нормального (первоначального) положения. Непосредственно после установки сенсоров и пробного включения системы было произведено обнуление сигналов, что соответствовало начальному углу установки сенсоров. Первоначальное включение системы было выполнено еще на стадии выполнения отдельных заключительных видов строительных работ и в период монтажа технического оборудования здания. В ходе испытаний для отдельных сенсоров, по ряду причин, были изменены позиции установки, а для некоторых - для обеспечения устойчивой связи с базовым блоком - потребовалась установка дополнительных репитеров – радиомодемов. После этих работ сенсоры не обнулялись, и в качестве начального состояния сенсоров были приняты их показатели на момент начала пробной эксплуатации.

В начальной стадии эксплуатации системы съем информации производился через непосредственное подключение flash-накопителя, затем - периодически, при доступе к системе через web-сервер. Накопление информации сенсора-инклинометра, датчика скорости и направления ветра и акселерометра происходило в базовом блоке системы.

Удобным способом графического отображения деформационных изменений состояния элементов несущего каркаса здания оказалось построения годографов угловых перемещений колонн в полярных координатах, привязанных к выбранной приведенной системе координат X^*Y^* . Угловая координата годографа Ang рассчитывалась по формуле

$$Ang = arctg\left(\frac{x^*}{y^*}\right), \quad (3)$$

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

Расчет модулей углов mod каждого сенсора производился по формуле

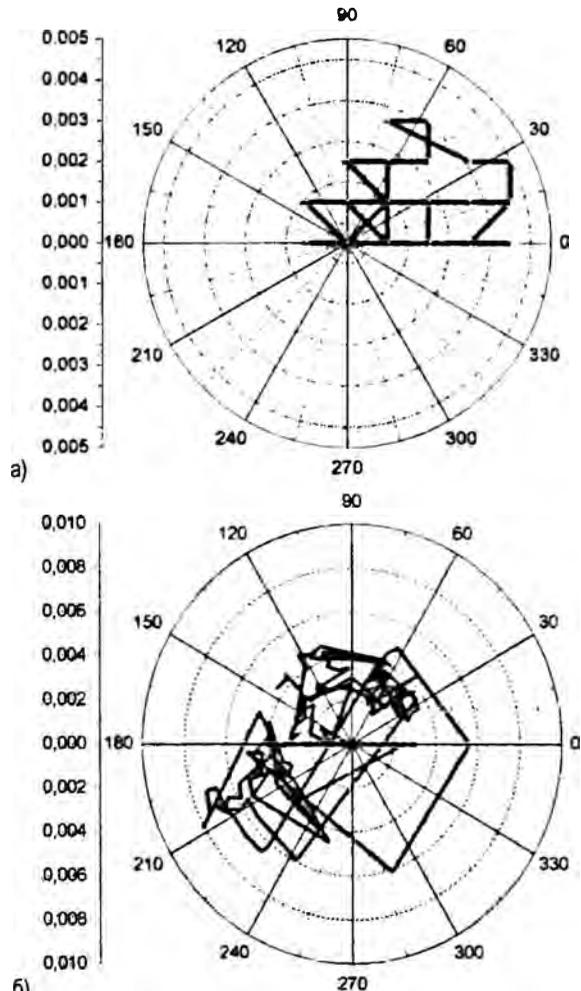
$$mod = \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2}. \quad (4)$$

На рис. 5 приведены годографы перемещений сенсоров 7 этажа в плоскости осей X^* , Y^* . За период наблюдений (19.08.2015 – 25.01.2016) средняя величина перемещений по этажам составила 0,007.. 0,025 углового градуса. Корреляция средних значений угла наклона колонн по этажам отсутствует (см. таблица 2), что косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком. Перемещения годографов векторов деформации (см. рис. 4) носят стохастический характер и не выходят за пределы характерной устойчивой области, что также свидетельствует об отсутствии накопления деформаций вследствие усадочных процессов в фундаменте и конструкциях здания. Динамика деформационных процессов представлена медленными – период колебаний не менее нескольких

суток – изменениями углов наклона контролируемых колонн. Анализ данных с часовым временным разрешением за период с 30.09.2016 по 11.10.2016 также не выявил высокочастотных процессов. Временные диаграммы имеют плавный характер без признаков динамических и ударных нагрузок.

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции средних по этажам значений модулей векторов наклона колонн

Этажи	Козфф. коррел. <i>mod</i> наклона	Козфф. коррел. углов годографов
21эт – 7эт	0,355	0,0187
21эт – подвал	-0,164	-0,189
7эт – подвал	-0,081	0,086



а) – для одного сенсора; б) – среднее угловое перемещение сенсоров 7 этажа

Рисунок 5 – Годографы векторов перемещений инклинометров 7 этажа здания за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

Выявлена значимая корреляция угловых деформационных перемещений колонн от температуры. На рис. 5 показаны совместные диаграммы изменений модулей угла наклона контролируемых колонн и температуры.

Для всех без исключения датчиков устойчивое и близкое к 1 значение коэффициента корреляции наблюдается в интервале температур +12°...+18°С. При меньшей температуре (+5°..+12°С) коэффициент корреляции становится неустойчивым, принимая значения в пределах от -1 до +0,95. Характерным также является образование отдельных групп близких значений коэффициента (см. рис. 6). Влияние ветровой нагрузки на деформацию каркаса здания в период наблюдения не выявлено.

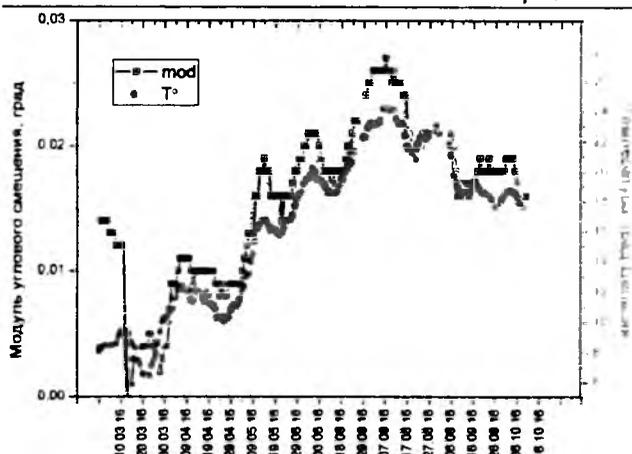


Рисунок 6 – Зависимость угловых смещений сенсора ID-05 от температуры

Заключение. При возведении высотных (высотным является многоэтажное здание жилого назначения высотой от 75 до 100 м включительно, общественного и многофункционального назначения - высотой от 50 до 200 м включительно) и уникальных по архитектуре зданий зачастую становится проблематичным использовать несущие конструкции с большими запасами прочности, что при сочетании неблагоприятных факторов может увеличить риск их разрушения. А использование высокопрочных бетонов, склонных к хрупкому разрушению, может создать предпосылки прогрессирующего обрушения конструкций.

В связи с этим, с целью обеспечения необходимого уровня безопасности, как на стадии возведения, так и в период эксплуатации здания, важную роль приобретают системы автоматизированного мониторинга за деформационным состоянием несущих конструкций здания. Назначением информационно-измерительной системы автоматизированного мониторинга является снижение риска аварийной ситуации на

основе ранней диагностики изменений напряженно-деформированного состояния конструкций и локализации мест такого изменения.

Выполненные работы показали достаточно высокую эффективность использования инклинометров в качестве измерительной основы автоматизированной системы мониторинга несущего каркаса строительных объектов. Показатели чувствительности и долговременной стабильности метрологических характеристик инклинометров позволяют регистрировать практически любые деформационные изменения геометрии несущего каркаса здания, в том числе, обусловленные вариацией температуры. Следует отметить компактность конструкции и удобство монтажа рассмотренных датчиков. Указанное их качество в сочетании с беспроводным интерфейсом позволяет оперативно, с малыми издержками организовать информационно-измерительную мониторинговую сеть, а при необходимости осуществлять её переконфигурирование в эксплуатируемых зданиях и сооружениях. В качестве методической основы обработки данных системы предлагается корреляционный анализ приращений углов наклона ключевых конструкций. Выявлено сильное влияние на показатели деформации элементов несущего каркаса здания температуры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108-2008 (02250). – Минстройархитектура, 2008, Введ. в действие 12.06.2008 – 85 с.
2. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Специальные технические условия в области архитектуры и строительства. Порядок разработки, построения, изложения, согласования и утверждения: ТКП 45-1.01-234-2015 (33020). – Минстройархитектура, 2015, введ. в действие 20.02.2015 – 13 с.
3. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.

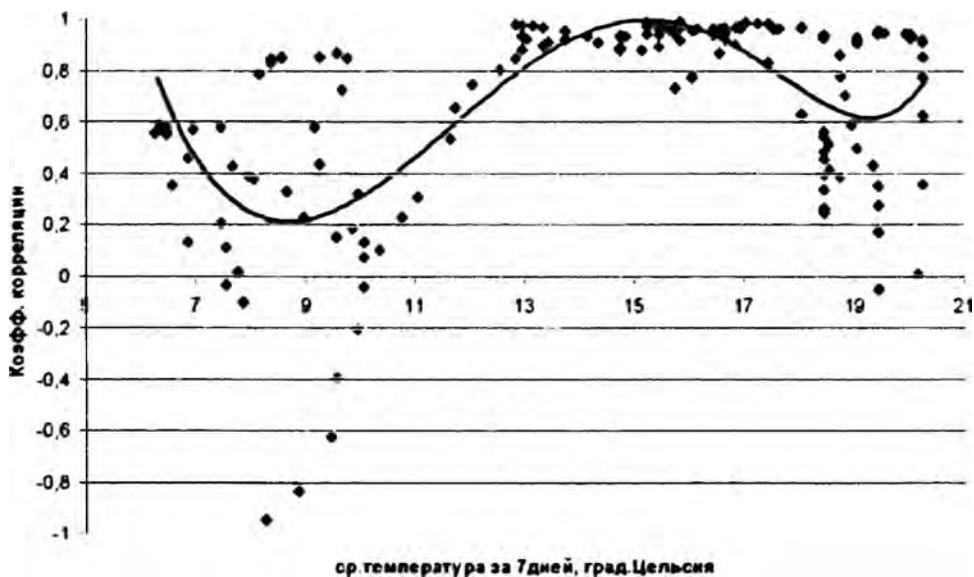


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента корреляции угловых смещений сенсора ID-09 от температуры

Материал поступил в редакцию 26.01.2017

SNEZHKOV D.Yu., LEONOVICH S.N The automated monitoring of the state of load-bearing buildings structures

Discusses issues for automated monitoring of high-rise buildings. As the methodological basis of monitoring data processing system is proposed correlation analysis inclination angles increments of key support frame elements. On the data basis of a high-rise building monitoring data in Minsk considered the efficiency of use as the recorded tilt angle settings structural framing columns. Found a significant correlation between the angular displacement of the deformation of columns with temperature.