



doi: 10.18720/CUBS.69.2

## Мониторинг технического состояния раздвижной крыши стадиона «Санкт-Петербург Арена»

### Monitoring of technical condition of the St. Petersburg Arena Stadium Sliding Roof

Г.В. Осадчий <sup>1</sup>, А.А. Белый <sup>2</sup>, Д.В. Ефанов <sup>3</sup>, Д.А. Шестовицкий <sup>4\*</sup>, G.V. Osadchy <sup>1</sup>, A.A. Belyi <sup>2</sup>, D.V. Efanov <sup>3</sup>, D.A. Shestovitskiy <sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>ЗАО "НТЦ "Мониторинг мостов", Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>RSC "Monitoring of Bridges", St. Petersburg, Russia

<sup>2-4</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2-4</sup>Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

непрерывный мониторинг;  
структурный мониторинг;  
инженерные конструкции;  
текущий контроль;  
диагностирование;  
прогнозирование;

#### KEYWORDS

continuous monitoring;  
structural monitoring;  
engineering constructions;  
routine control;  
diagnosis;  
forecasting;

#### ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 21.02.2018  
Принята: 14.08.2018

#### ARTICLE HISTORY

Submitted: 21.02.2018  
Accepted: 14.08.2018

#### АННОТАЦИЯ

Авторами описывается комплекс мероприятий по разработке и созданию системы непрерывного мониторинга технического состояния конструкции крыши стадиона «Санкт-Петербург Арена», введенного в эксплуатацию в городе Санкт-Петербурге в конце 2016 года. Уникальность конструкции предопределила тщательный анализ расстановки измерительных контроллеров в компьютерной модели объекта диагностирования. В работе дается описание объекта диагностирования в целом и раздвижной крыши, а также указываются точки подключения датчиков измерительных контроллеров с указанием необходимого их количества (использованы тензометры, инклинометры, датчики прогиба, а также метеостанция). Представленные технические решения позволяют передавать результаты мониторинга в городской ситуационный центр, что, в свою очередь, повышает уровень безопасности и снижает риски возникновения чрезвычайных ситуаций на объекте диагностирования.

#### ABSTRACT

The authors describe a set of measures for developing and creating of a continuous monitoring system for technical condition of the St. Petersburg Arena stadium roof structure. This stadium began operating in Saint Petersburg in late 2016. The uniqueness of the design was predetermined by the careful analysis of the measuring controllers arrangement in the computer model of the diagnostic object. The work describes the object under test in general and the sliding roof apart, as well as the connection points of the measuring controllers sensors indicating the required number of them (strain gauge, inclinometer, deflection sensors, and a weather station are used). The technical solutions introduced in the paper allow the transfer of monitoring results to the city's situation center, which in turn increases safety level and reduces the emergencies risks at the diagnostic site.

#### Содержание

1.	Введение	11
2.	Результаты и обсуждение	11
3.	Заключение	20

## 1. Введение

Современные инженерные сооружения представляют собой сложные технические объекты, включающие в себя как уникальные архитектурные новации, так и усовершенствованные средства автоматизации управления и контроля состояния с возможностью прогнозирования дальнейших изменений. Развитие научно-технического прогресса позволяет в процессе создания сооружений и конструкций как в транспортной отрасли (мосты, путепроводы, развязки дорог в разных уровнях, само дорожное покрытие, железные дороги и т.д.), так и в строительной сфере (здания, торговые и промышленные комплексы, спортивные объекты и т.д.) предусматривать использование интегрированных и внешних средств технического диагностирования, а также оперативного периодического и непрерывного мониторинга, способных оперативно передавать данные о техническом состоянии объекта диагностирования с указанием прогнозируемых сроков безотказной работы [1 – 26]. Это значительно упрощает и удешевляет эксплуатацию сложных технических объектов, а также позволяет повысить уровень безопасности их использования.

В 2004 году в третьем по величине городе Европы, Санкт-Петербурге, было решено возвести новый футбольный стадион в западной части Крестовского острова, который стал бы современным безопасным спортивным сооружением для культурной столицы РФ и ее ведущего футбольного клуба «Зенит» [27]. Именно на нем планировалось проведение части матчей 21 чемпионата мира по футболу 2018 года!

Футбольный стадион построен по проекту японского архитектора Кисё Курокавы и строился более десяти лет. Он содержит такие необычные инженерные сооружения, как выдвигное поле и раздвижную крышу, что необходимо из-за климатических особенностей расположения технического сооружения и условий роста травы в зимний период года. Кроме того, «Санкт-Петербург-Арена» является самым вместительным (69501 место) из стадионов, оснащенных одновременно раздвижной крышей и выдвигным полем, а таких сооружений всего четыре в мире наряду с «Фелтинс-Арена» (Германия), «Гелредом» (Нидерланды) и «Юниверсити оф Финикс» (США).

За время постройки изменилось многое в строительстве и стоимости работ, но главное – усовершенствовались технологии технического диагностирования и непрерывного мониторинга, позволяющие не только собирать диагностические данные, но и автоматически их обрабатывать и передавать полученные результаты в городской ситуационный центр. Это позволило создать не только современный стадион, расположенный в центре города, но и безопасное техническое сооружение, с возможностью прогнозирования состояния и, в частности, автоматического выявления предельных значений деформаций и нагрузок.

Данная статья посвящена описанию результатов в области разработки и реализации непрерывного мониторинга основных элементов конструкции крыши футбольного стадиона «Санкт-Петербург-Арена», как наиболее сложного инженерного сооружения данного объекта.

Целью настоящей статьи является разработка проектных решений и практических рекомендаций по повышению безопасности эксплуатации уникального объекта гражданской инфраструктуры.

Для этого было сформулировано и решено несколько задач:

- анализ развития систем мониторинга в России и за рубежом на наиболее крупных стратегических объектах;
- анализ отечественной нормативной базы для мониторинга;
- выявление общих закономерностей в системах мониторинга;
- анализ рассматриваемого объекта (крыша стадиона «Санкт-Петербург-Арена») с обоснованием оснащения средствами мониторинга;
- теоретическое обоснование применяемых подсистем мониторинга;
- анализ полученных результатов.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Развитие технологий мониторинга во второй половине XX века – первой половине XXI века

#### 2.1.1. От первых систем контроля состояния к современным системам мониторинга

Системы периодического и непрерывного мониторинга в настоящее время активно развиваются и внедряются на всех критически важных объектах: от объектов недвижимости (строительные сооружения) до подвижных объектов (самолеты, поезда, автомобили и пр.). Можно сказать, что наступила эпоха внедрения средств периодического и непрерывного мониторинга, которые по своему развитию становятся похожими на мощнейшие средства автоматического распознавания технического состояния и

прогнозирования дальнейших изменений рабочих параметров (не в пример системам диспетчерского контроля XX века и их аналогам, развивающимся и сегодня [6, 7]). Обратим внимание на развитие технологий мониторинга строительных сооружений и инженерных конструкций.

Необходимость создания технических систем контроля состояния конструкций (и позже диагностирования и прогнозирования) стала очевидна с появлением смелых архитектурных решений, принимаемых проектировщиками, широкого выбора инновационных материалов, используемых в строительстве, а также при выборе мест расположения самого объекта технического диагностирования.

Основоположниками в создании и развитии технологий мониторинга стали такие компании как [28 - 30]:

1. «COWI» (Дания). Объекты внедрения:
  - Мост Наини Аллабад (Аллахабад, Индия), главный пролет 260м;
  - мост камнетесов (Гонконг, Китай), главный пролет 1018м;
  - мост Сео Хаи Seohae (Бухта Асан, Корея), главный пролет 480м.
2. «NGI», «Noptel OY» (Финляндия). Объект внедрения:
  - мост Скарнсандет (Тронхейм, Норвегия), главный пролет 530м.
3. «Freyssinet», «Advitam» (Франция). Объекты внедрения:
  - более 100 объектов по всему миру, в том числе мост «Рион-Антирион» (Рион, Антирион, Греция).
4. «Public Works & Government Services» (Канада):
  - мост Конфедерации (Нью-Брансуик, Канада), главный пролет 250м.

Здесь перечислены фирмы-производители, занимающиеся мониторингом мостовых сооружений. Результаты в области мониторинга мостовых сооружений легко экстраполируются на технические сооружения в виде зданий и конструкций.

Мониторинг – система постоянных (в пространстве и во времени) наблюдений (регистраций), контролирующая процессы взаимодействия природных и техногенных воздействий и объекта исследования.

Мониторинг, как инструмент научных исследований, впервые начал применяться в 70-х годах XX века. Первоначально под мониторингом подразумевалась система наблюдений за окружающей средой, контролирующая процессы взаимодействия природы и человека. В работах и научных исследованиях, посвященных природоохранному и экологическому вопросам, мониторинг очень быстро становится одним из самых употребляемых понятий. В настоящее время разработаны и функционируют разнообразные системы экологического мониторинга, определяющие организацию постоянных наблюдений в пространстве и во времени за техногенными изменениями природной среды и контроля ее состояния при хозяйственной деятельности разного рода [31].

Общие принципы экологического мониторинга послужили, в частности, основой для создания инженерного мониторинга как нового направления в области организации эксплуатации сложных строительных сооружений, к числу которых относятся и мосты.

В 70-х годах XX века мониторинг конструкций сводился к автоматическому инструментальному сбору данных с критических точек конструкций. Тенденция медленно шла от небольших систем, загруженных только статическими параметрами, к современным системам мониторинга (SHMS – Structural Health Monitoring System) «под ключ», с сетью измерительных контроллеров и встроенной оценочной аналитической системой. Данные системы активно развиваются в странах Европейского Союза, так как их внедрению способствует правовое поле, позволяющее собственнику инфраструктурного объекта получать понижающий коэффициент в стоимости обязательной страховки. В случае стоимости объекта многие миллиарды евро даже десятые доли процентов экономии на страховой премии – это весьма значительные суммы.

Помимо финансовых стимулов ситуация в области внедрения средств периодического и непрерывного мониторинга резко изменилась в результате сильного скачка в развитии информационных технологий в последние двадцать лет. Высокоточные сенсоры, самые современные блоки, широкополосные аналогово-цифровые конвертеры, оптическая беспроводная сеть, спутниковые системы определения местоположения и прочие технические достижения проложили путь к большей точности, скорости и экономичности получения данных. Для целей структурного анализа используется новейшее программное обеспечение, что увеличивает производительность обработки большого объема данных. В последнее время значительный вклад был сделан в увеличение надежности оборудования и механизмов и экологическую безопасность конструкций, что сказывается и на эффективности их эксплуатации и обслуживания.

С развитием рынка данных услуг SHMS выделилась как отдельный класс (услуг) необходимых к применению в индустрии строительства. На рынке появились разнообразные технические решения, как от отечественных, так и от зарубежных производителей.

### 2.1.2. Основные понятия в области мониторинга

Конкретизируем основные понятия в области мониторинга строительных конструкций.

Под **мониторингом технического состояния** согласно ГОСТ Р 22.1.13-2013 понимается контроль состояния объекта (строительного) путем его периодического обследования или с помощью стационарных систем контроля (мониторинга).

**Техническое состояние** (строительных конструкций и грунтовых оснований) – категория состояния несущих элементов зданий и сооружений, оцениваемого по одному из двух критериев:

- по дефектам и повреждениям в соответствии с ГОСТ 15467-79 и РД 22-01.97;
- по снижению несущей способности конструкций и грунтовых оснований в соответствии с ГОСТ Р 31937-2011 и СП 13-102-2003.

**Несущая способность** конструкции и грунтового основания оценивается по одному из критериев:

- по нагрузкам:

$$P_{\text{ф}} \leq P_{\text{кр}},$$

где  $P_{\text{ф}}$  – фактическая нагрузка, воспринимаемая конструкцией или грунтовым основанием;  
 $P_{\text{кр}}$  – критическая нагрузка, которую способны выдерживать конструкции и грунтовое основание;

- по напряжениям:

$$\sigma_{\text{ф}} \leq R,$$

где  $\sigma_{\text{ф}}$  – фактическое напряжение в материале конструкций или грунтовой массе;  
 $R$  – предел прочности материала конструкций или грунта.

**Техническое диагностирование** подразумевает распознавание технического состояния элементов или зданий и сооружений в целом, выявление причин возникновения состояния, отличного от работоспособного, и принятие технического решения по приведению объекта в работоспособное состояние.

**Цели и задачи мониторинга** прагматичны. Их можно свести к следующим положениям:

1. Своевременное оповещение о критическом изменении состояния конструкций и принятия обоснованных решений:

- по обеспечению безопасности посетителей и персонала;
- по обеспечению условий безопасной эксплуатации;
- по прекращению эксплуатации.

2. Мониторинг и регистрация в течение всего срока эксплуатации изменений состояния конструкций вследствие накопления в них повреждений и развития дефектов, которые с течением времени могут привести сооружение в предельное состояние, требующее соответствующего ремонта или прекращения эксплуатации.

На территории РФ и таможенного союза работы по внедрению систем мониторинга инженерных сооружений (СМИС) и систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) регламентируются рядом документов, основные из которых:

1. ФЗ от 12.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».
2. ФЗ от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
3. ФЗ от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
4. ГОСТ Р 22.1.12-2005 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами (СМИС) зданий и сооружений. Общие требования».
5. ТСН 50-302-2004.\*
6. ТСН 31-332-2006.\*

\*Территориальные строительные нормы Санкт-Петербурга.

Объем процедур по мониторингу (число точек, частота опроса и т.д.), а также критерии выбора объектов основываются на теории анализа рисков (см. ГОСТ Р 51901.3-2007 (МЭК 60300-2:2004) «Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надежности»).



## 2.2. Особенности технического состояния объекта диагностирования

### 2.2.1. Общая характеристика объекта

Стадион размещается на месте стадиона имени Кирова в западной части Крестовского острова города Санкт-Петербурга и имеет следующие характеристики:

Стадион имеет овальную форму в плане, высота – 55 м (верхняя отметка кровли). Высота пилонов - 104 м. Диаметр чаши стадиона (по крыше) – 289 м.

Вместимость стадиона составляет около 69 тыс. человек. Общая площадь внутренних помещений стадиона – 262 тыс. кв. м (по первоначальному проекту – 172 тыс. кв. м).

Арена представляет собой семиэтажную конструкцию. Первые два этажа скрыты в структуре восстанавливаемого холма. Четыре этажа стадиона из семи занимают подтрибунные помещения и трибуны, а верхний этаж используется как терраса для обзора. На стадионе имеется VIP-зона на 7 тысяч мест, правительственная ложа на 60 мест и гостевые ложи на 50 мест. Для освещения проходящих там соревнований оборудовано 2100 мест для журналистов. В здании стадиона также предусмотрены магазины, ресторан, выставочный зал, автостоянки, бизнес-центр, помещения для спортсменов, судей и прессы.

Вокруг стадиона создана современная инфраструктура, в том числе построено несколько парковок. При этом сохранен и отреставрирован старый вход стадиона им. Кирова. Стадион по совокупности сложности не имеет аналогов и сертифицирован на разряд «А» для допуска к играм любого уровня FIFA и UEFA.

Арена является уникальным сооружением и, согласно действующим нормам (ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований» (пункт 9.5 для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности (1а и 1б), статьи 48.1 Градостроительного кодекса Российской Федерации «Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты», ГОСТ Р 22.1.12–2005, п.4.9), для этого объекта однозначно определена необходимость системы непрерывного мониторинга инженерных систем (СМИС) для уникальных объектов.

### 2.2.2. Характеристика конструкции

Из общего перечня конструкций выделим и рассмотрим организацию системы мониторинга стационарной крыши стадиона. Основные несущие элементы конструкции кровли стадиона «Санкт-Петербург-Арена» образуют пологий ребристо-кольцевой купол с круглым проемом над футбольным полем (рис. 1).



**Рисунок 1. Внешний вид крыши на этапе строительства**

Для перекрытия проема предусмотрена двухстворчатая, прямоугольная в плане, раздвижная кровля, которая перемещается по врезанным в конструкцию купола ездовыми фермам, расположенным параллельно длинной стороне поля. Между ездовыми фермами и внешним кольцом купола устроены легкие фермы, не участвующие в работе основных конструкций. С западной и восточной стороны конструкция купола поддерживается наклонными пилонами. Основные размеры купола следующие:

- внешний диаметр составляет 286 м;
- радиус кривизны внешней поверхности покрытия - 725 м;

- диаметр проема над полем составляет 150 м;
- расстояние между осями ездových ферм равно 90 м.

Роль внешнего опорного кольца купола, воспринимающего распор, выполняют балка наружного окаймления и ортотропная плита. Роль внутреннего кольца купола, воспринимающего сжатие, выполняет несущее кольцо. Тангенциальные фермы работают как промежуточные кольца купола. Функцию ребер купола выполняют радиальные фермы.

Кровля опирается на конструкции чаши стадиона через 48 стоек, установленных под радиальными фермами, и через 4, установленных под ездowymi фермами. Стойки радиальных ферм опираются на чашу через опорные части, запрещающие поступательные перемещения в вертикальном и тангенциальном направлениях. Стойки ездowych ферм опираются на опорные части, запрещающие перемещения в вертикальном направлении. Кроме стоек вертикальные нагрузки кровли воспринимают 8 шарнирно-опертых пилонов, наклоненных к центру стадиона. Элементы конструкции, в основном, имеют коробчатые, двутавровые и трубчатые сечения.

## 2.3. Концепция мониторинга крыши

### 2.3.1. Описание расчетной модели

Основная кровля стадиона рассматривается в процессе расчета как пространственная конструкция. В расчетной модели конструкции использованы следующие типы конечных элементов:

- пространственный стержень рамного типа с 6 степенями свободы в узле – основная масса элементов;
- пространственный стержень ферменного типа с 3 степенями свободы в узле, моделирующие ванты;
- конечный элемент оболочки с 3 или 4 узлами – для задания ортотропной плиты, а также в качестве фиктивных элементов очень маленькой жесткости, предназначенных исключительно для моделирования нагрузок;

Вертикальные нагрузки от покрытия на нижележащие конструкции передаются через стойки, расположенные под радиальными фермами, качающиеся стойки, расположенные под ездowymi фермами, и пилоны.

Стойки под радиальными фермами, выполненные из круглой трубы, прикреплены жестко к радиальной ферме и через опорные части шарнирно с разрешенным перемещением в радиальном направлении к нижележащим конструкциям. Качающиеся стойки закреплены жестко к ездовой ферме и шарнирно к нижележащим конструкциям. Пилоны закреплены шарнирно, с запретом вращения вокруг оси пилона.

Горизонтальные нагрузки с покрытия на нижележащие конструкции передаются через V-образные стойки, расположенные под радиальными фермами в осях X и Y глобальной системы координат. В расчетной модели V-образные стойки закреплены жестко к радиальным фермам и шарнирно с запретом перемещения в вертикальном направлении к нижележащим конструкциям.

Расчетная модель построена таким образом, чтобы основная масса узлов располагалась по нейтральной оси инцидентных к ним стержневых элементов. В тех узлах, где это условие не выполняется, применяются эксцентриситеты (жесткие вставки от узла до деформируемой оси стержневого элемента) или абсолютно жесткие тела, связывающие перемещения различных узлов расчетной модели

### 2.3.2. Концепция мониторинга

В результате анализа расчетной модели формируется концепция (методика) проведения мониторинга, основные положения которой для стадиона «Санкт-Петербург-Арена» характеризуются следующим образом.

С учетом высотности здания в соответствии с классификацией по ГОСТ Р 22.1.12-2005 наиболее вероятными факторами, способными влиять на изменение напряженно-деформируемого состояния (НДС), снижение несущей способности (НС) остова данного здания и изменение его пространственного положения, являются:

1. Неравномерная осадка (просадка) грунтового основания, из-за чего могут возникать крены несущего остова, при которых возможно изменение НДС конструктивных элементов несущего остова здания, возникновение нормальных и касательных напряжений и деформаций в их сечениях и, как следствие, снижение их НС.
2. Неблагоприятные геофизические условия, связанные, например, с изменением инженерно-геологических и гидрогеологических условий на территории застройки, а также с наличием литологических разломов земной коры на данной территории, что должно быть учтено в задании на проектирование здания.

3. Статическая и динамическая (пульсационная) составляющие ветровой нагрузки.
4. Сейсмические воздействия, которые должны учитываться в соответствии с требованиями ТСН 31-332-2006 при землетрясениях, возникающих, в том числе, за пределами Северо-Западного (в целом малосейсмичного) региона РФ.
5. Возникновение условий нерасчетной загрузки несущих элементов здания в процессе его эксплуатации.
6. Предупреждение чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с воздействием указанных в п. 1 факторов, способных приводить к изменению НДС и снижению НДС несущего остова и грунтового основания и его кренам, должно достигаться способами, указанными в п.п. 3, 4.

Напряженно-деформированное состояние обычно определяется тензометрическим методом. Для этого существуют специальные датчики – тензометры. Они измеряют деформацию в определенной точке (зоне) элемента конструкции, и затем, используя закон Гука, определяются напряжения.

В данном случае на стадионе были использованы широко применяемые «усовершенствованные» тензометры – тензорезисторы, принцип действия которых основан на использовании зависимости между деформацией и электрическими величинами: омическим сопротивлением (преимущественно), емкостью, индуктивностью и др. В частности, авторами статьи были использованы водонепроницаемые фольговые полномостовые 4-элементные тензорезисторы фирмы КСW. Они устанавливались методом точечной сварки, что значительно упростило работу в полевых условиях. Точность измеряемых величин составляет (при пересчете) 0,1 МПа.

Вибрационная подсистема мониторинга предоставляет динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений и частотных картин колебаний. Эти характеристики интегрально содержат данные о жесткостях, массах сооружения и внешних воздействиях.

Результаты измерений при «динамическом мониторинге» позволяют выявить скрытые изменения прочностных свойств конструкций [32]. Таким образом, в задачи динамического мониторинга входит следующее:

- определение доминирующих частот свободных колебаний;
- оценка влияния сейсмической активности на динамическую работу сооружения;
- установление уровня влияния транспортных нагрузок на динамические характеристики;
- анализ частот с целью оценки и прогноза изменения технического состояния.

Необходимость решения поставленных в рамках динамического мониторинга задач открывает широкое поле как для исследований самих конструкций с оценкой развития в них скрытых повреждений, так и с точки зрения методик, инструментария и постановки задач мониторинга. И в связи с этим следует отметить, что одной из основных характеристик любой конструкции являются параметры собственных колебаний, представленные в виде набора частот и соответствующих им форм колебаний.

Из динамики сооружений известно уравнение

$$(C - \lambda E)\vec{v} = 0 \quad (1)$$

где  $C=AM$ ;  $A$  – матрица податливостей системы с  $n$ -степенями свободы;

$M$  – диагональная матрица масс;

$E$  – единичная диагональная матрица;

$\lambda$  – собственное значение матрицы  $C$ ;

$\vec{v}$  – собственный вектор матрицы  $C$ .

Подсистема контроля наклона элементов базируется на применении инклинометров (наклономеров), принцип действия которых имеет под собой геодезическую составляющую.

Следует обратить внимание на последовательность устройства системы мониторинга. При разработке концепции были выделены два этапа. На первом этапе ряд датчиков был установлен во время строительства стадиона. Выделение данного этапа касается задачи мониторинга не только стационарной крыши стадиона, но и других несущих конструкций. Связано это с необходимостью оценки состояния конструкций в контрольных точках не только от временной нагрузки, но и от собственного веса. Для решения задачи постоянного и оперативного оценивания влияния перечисленных факторов на НДС остова здания проектом мониторинга предусматривается в составе стационарной автоматизированной системы мониторинга инженерных конструкций (СМИК) использовать комплект тензометрического контроля (ТК) на базе тензометров, устанавливаемых начиная с этапа строительства объекта. На втором этапе после окончания возведения несущих конструкций в ранее установленную систему на базе ТК вносят дополнительные контрольные точки тензометрии, а также статическую диагностическую систему (СДС) на базе инклинометров, устанавливаемых на восьми пилонах сооружения и в различных высотных уровнях

здания по плановым осям  $x-x$ ,  $y-y$ , обеспечивающих контроль кренов несущих элементов сооружения, вызванных их деформациями и осадками грунтового основания, СДС также составляют датчики линейных перемещений и вибрационную диагностическую систему (ВДС) (рис. 2).

Конкретно для системы мониторинга стационарной крыши определены следующие критически важные конструкции и элементы, подлежащие оснащению средствами СМИК:

- пилоны;
- ванты;
- опорное кольцо;
- радиальные фермы;
- тангенциальные фермы;
- ездвые фермы;
- стойки радиальных и ездвых ферм.

Контролируемыми параметрами в СМИК являются:

1. Конструктивные отклики:
  - напряженно-деформированное состояние (НДС);
  - вибрация;
  - изменение конфигурации конструкции – уклоны и сдвиги.
2. Факторы влияния окружающей среды:
  - метеорологические и геологические условия;
  - изменения температур, скорости и направления ветра.
3. Факторы нагрузки:
  - температурные градиенты материалов;
  - колебания почвы;
  - поведение монтажных агрегатов.



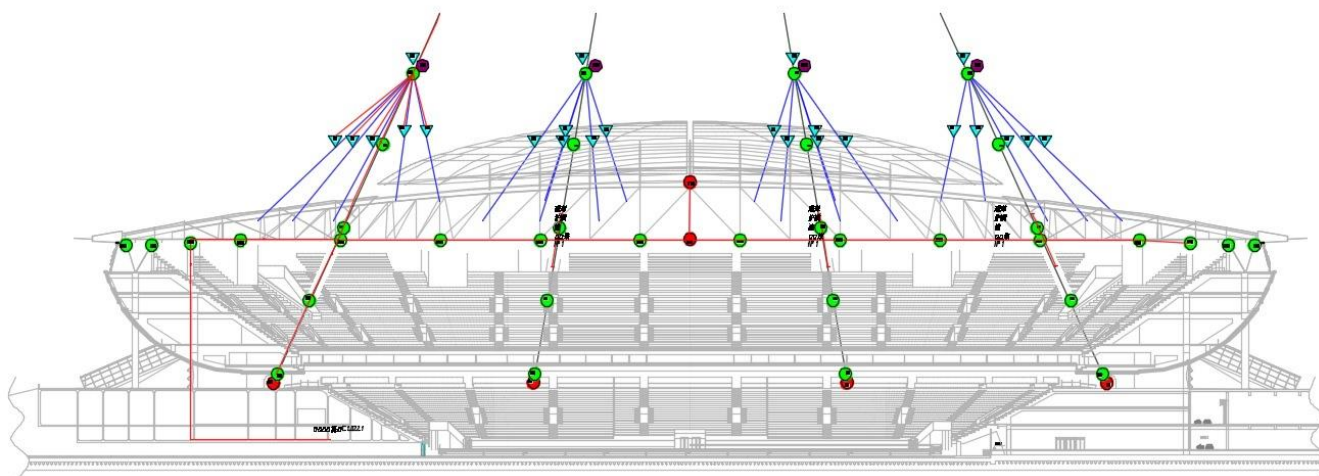
**Рисунок 2. Состав систем мониторинга**

Определение перечисленных характеристик конструкций стационарной крыши применительно к конструкциям (рис. 3 и рис. 4): изменение конфигурации конструкции в целом (наклоны); пилоны (напряженно-деформированное состояние; наклоны); ванты (натяжения); опорное кольцо, радиальные фермы, ездвые фермы, стойки радиальных и ездвых ферм (напряженно-деформированное состояние). В таблице 1 представлен состав измерительных контроллеров, расположенных на объекте диагностирования.

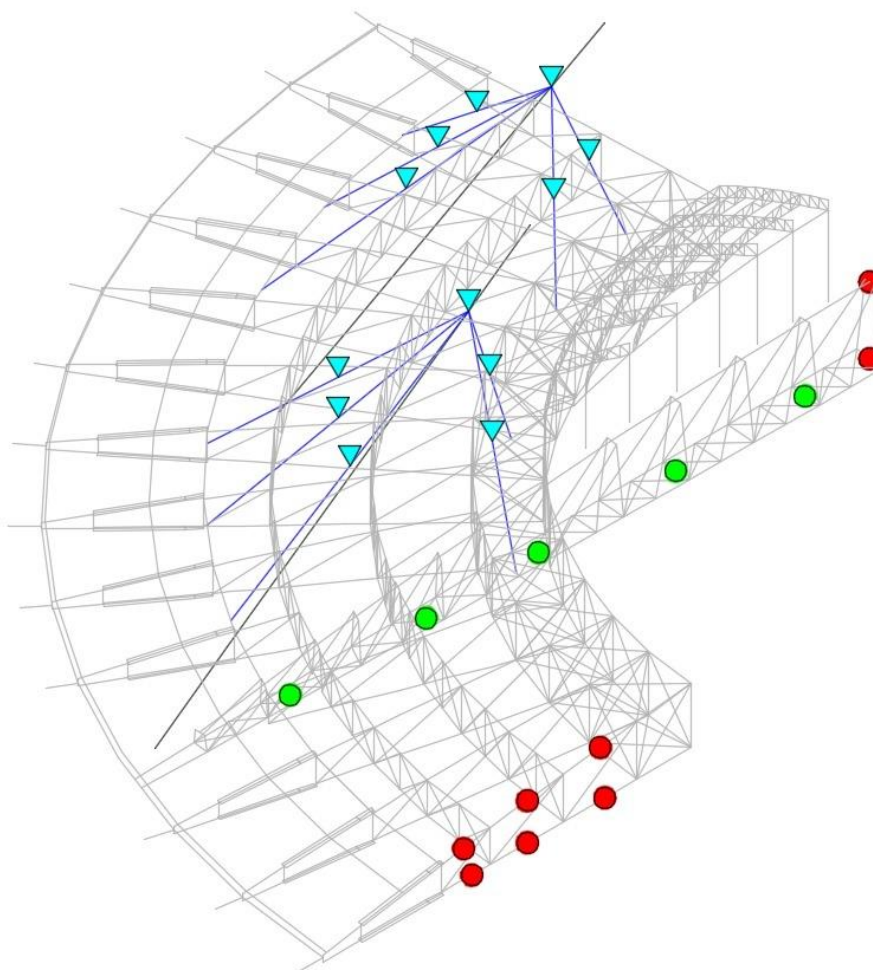
**Таблица 1. Контролируемые параметры на схеме по числу точек контроля**

Объект	Измерительные контроллеры
Пилоны	Для контроля напряжения установлены 2 тензометра в средней части и 8 – на пилонах (всего 16 шт.); для контроля положения установлены инклинометры на каждом пилоне (всего 8 шт.).
Ванты	Для контроля усилия натяжения установлен один датчик на один вант четырех пилонов (всего 4 шт.).
Опорное кольцо	Для контроля напряжения на заворотном секторе в верхнем и нижнем поясе (в середине) установлены два тензометра (всего 4 шт.).
Ездвые фермы	Для контроля напряжения установлены по одному тензометру в середине пролета в верхнем и нижнем поясах (всего 4 шт.); для контроля прогибов установлены два датчика измерения прогибов в середине пролета на нижнем поясе (всего 2 шт.).
Стойки радиальных и ездвых ферм	Для контроля напряжения установлены по два тензометра на четырех лямбда-образных стойках (всего 8 шт.), а также по одному тензометру на качающихся стойках (всего 8 шт.).
Раздвижная крыша	Для климатических измерений установлена одна метеостанция на раздвижной крыше.





**Рисунок 3. Расположение точек мониторинга в профиле**



**Рисунок 4. Расположение точек мониторинга в срезе конструкции:  
 «треугольник» – датчики натяжения (датчики усилия),  
 «круг» – датчики напряжения (тензометры) на металле на радиальной ферме:  
 красный – датчики растяжения, зеленым – датчики сжатия**

На рисунке 5 представлена структурная схема увязки измерительных устройств с постом централизации. Датчики сгруппированы по географическому принципу на четыре зоны расположения с наименованиями P100.1AUX (северо-восточная сторона крыши), P100.2AUX (юго-западная сторона крыши), P100.3AUX (пилоны западной стороны стадиона), P100.4AUX (пилоны восточной стороны стадиона). От децентрализованных датчиков информация поступает в диспетчерский центр, где расположены центральные устройства P100 (измерительный процессор) и S100 (сервер).

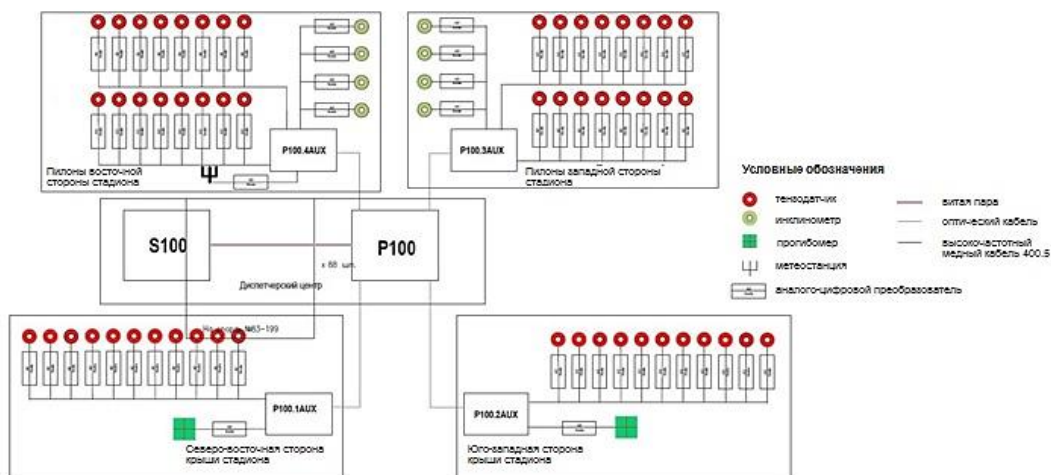


Рисунок 5. Структурная схема связи

На рис. 6 и рис. 7 поясняется принцип расстановки и установки тензометров на крыше стадиона. В таблице 2 для примера даются результаты измерений на северо-восточной части крыши. Даются значения параметров и допуски.

Результаты мониторинга выводятся на автоматизированное рабочее место технолога мониторинга, являющегося web-приложением, где в режиме реального времени (и, при необходимости, в режиме архивного просмотра результатов измерений) представлены все измеряемые параметры. Они представлены как в списочной форме, так и в форме расположения датчиков на схематическом плане стадиона. Измеренные значения могут быть выведены в виде графических данных. При наличии критических отклонений в измеряемых параметрах осуществляется индикация на схематическом плане стадиона с указанием расположения измерительного прибора, зафиксировавшего критический уровень сигнала.

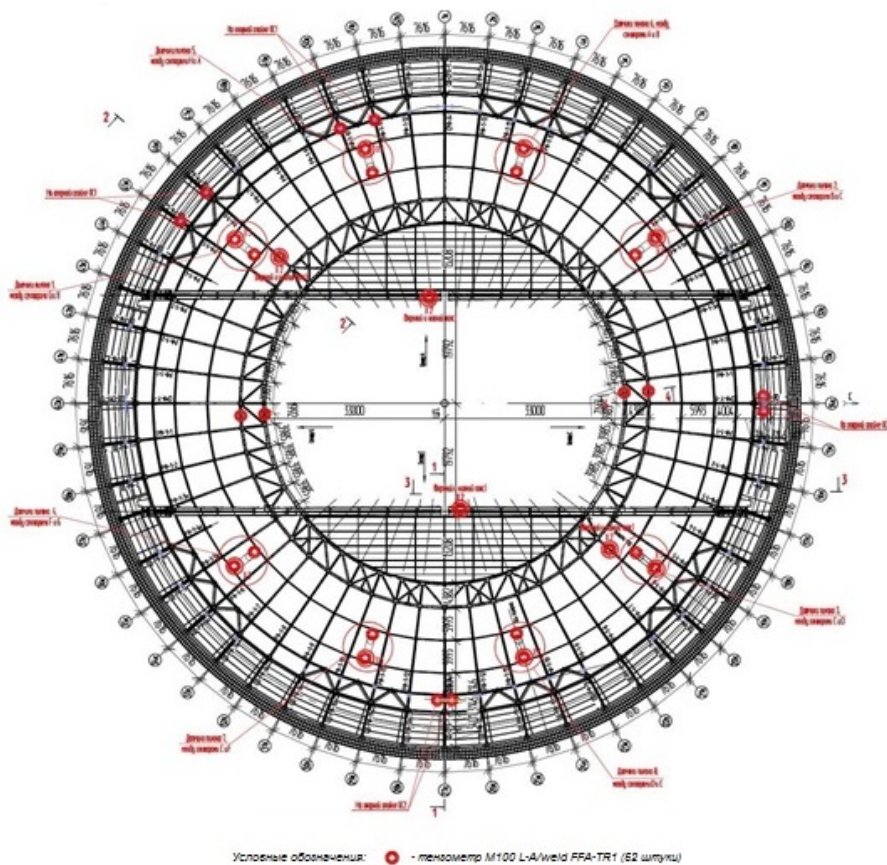


Рисунок 6. Схема расстановки тензометров на плане крыши

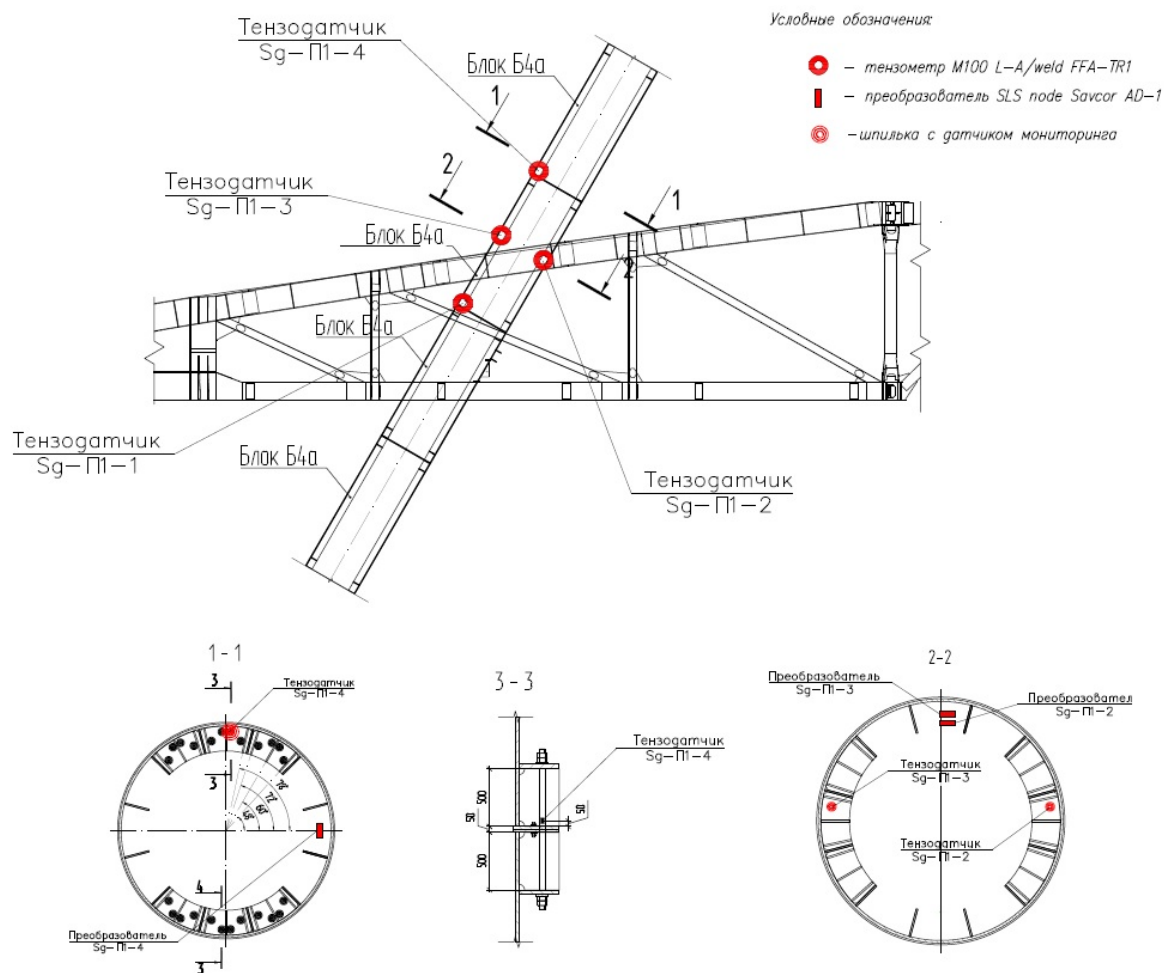


Рисунок 6.Схема установки тензодатчиков на пилоне

### 3. Заключение

Спроектированная авторами настоящей статьи система мониторинга стадиона «Санкт-Петербург-Арена» полностью отвечает требованиям, предъявляемым к современным системам мониторинга как в России, так и за рубежом. Объект по праву является одним из наиболее технически сложных, уникальных, возведенных в городе (и в стране) за последние годы.

Отечественные нормы проектирования систем мониторинга ориентированы, прежде всего, на МЧС, нежели на строительную составляющую, и требуют корректировки и доработки.

Вместе с тем требуется отметить специфику уникального сооружения и последующую техническую сложность эксплуатации конструкций. В связи с этим мониторинг будет являться тем инструментом, который обеспечит поддержание нормативных (проектных) уровней надежности, безопасности и долговечности сооружений.

Во главу проведенной работы были поставлены экономическая эффективность и унифицированный подход к предложенным решениям, что в совокупности с проведенным анализом конструкций объекта позволили обосновать адекватную расстановку средств мониторинга. С практической точки зрения указанные мероприятия позволят в будущем обеспечить и поддерживать заданные нормативные (проектные) уровни надежности, безопасности и долговечности мостовых сооружений.

Анализ полученных результатов позволяет говорить о проектной работе конструкций (см. табл. 2), и подтверждает функциональность примененной системы мониторинга.

Таким образом, реализованная на стадионе «Санкт-Петербург-Арена» система непрерывного мониторинга инженерных конструкций раздвижной крыши позволяет получать необходимую диагностическую информацию о техническом состоянии и своевременно передавать информационные сообщения в городской ситуационный центр. Это позволяет обеспечивать должный уровень безопасности данного сложного технического сооружения.



Таблица 2. Результаты измерений с точки AUX1

Датчик	Усредненные значения	Максимальное отклонение	Граничные значения
<b>Угловой пилон 1</b>			
Тензометр Sg-П1-1(15)	-15,3 МПа	-19,5 МПа	-313...313 МПа (предельное состояние) -250...250 МПа (предотказное состояние)
Тензометр Sg-П1-2(10)	-105,9 МПа	-124,9 МПа	
Тензометр Sg-П1-3(5)	82,7 МПа	53,1 МПа	
Тензометр Sg-П1-4(2)	247,0 МПа	211,0 МПа	
Инклинометр I-П1-1	X: -149,3, Y: -1634,2	X: -169,9, Y: -1107,3	не приводятся; являются производными показателями, зависящими от длины измеряемого объекта и угла наклона
<b>Рядный пилон 5</b>			
Тензометр Sg-П5-1(34)	150,0 МПа	201,3 МПа	-313...313 МПа (предельное состояние) -250...250 МПа (предотказное состояние)
Тензометр Sg-П5-2(33)	114,7 МПа	156,8 МПа	
Тензометр Sg-П5-3(31)	87,4 МПа	112,1 МПа	
Тензометр Sg-П5-4(102/28)	145,7 МПа	100,9 МПа	
Инклинометр I-П5-1	X: -270,7, Y: -488,6	X: -310,3, Y: -437,9	не приводятся; являются производными показателями, зависящими от длины измеряемого объекта и угла наклона
<b>Рядный пилон 6</b>			
Тензометр Sg-П6-1(14)	-195,1 МПа	-212,4 МПа	-313...313 МПа (предельное состояние) -250...250 МПа (предотказное состояние)
Тензометр Sg-П6-2(37)	5,2 МПа	-39,5 МПа	
Тензометр Sg-П6-3(36)	179,7 МПа	205,9 МПа	
Тензометр Sg-П6-4(35)	-101,1 МПа	-119,4 МПа	
Инклинометр I-П6-1	X: -159,5, Y: -906,4	X: -193,5, Y: -702,6	не приводятся; являются производными показателями, зависящими от длины измеряемого объекта и угла наклона
<b>Угловой пилон 2</b>			
Тензометр Sg-П2-1(6)	-143,4 МПа	-198,4 МПа	-313...313 МПа (предельное состояние) -250...250 МПа (предотказное состояние)
Тензометр Sg-П2-2(18)	-41,3 МПа	-43,2 МПа	
Тензометр Sg-П2-3(17)	51,2 МПа	70,2 МПа	
Тензометр Sg-П2-4(16)	-97,3 МПа	-112,4 МПа	
Инклинометр I-П2-1	X: -414,3, Y: 2321,9	X: 481,3, Y: 2098,2	не приводятся; являются производными показателями, зависящими от длины измеряемого объекта и угла наклона
<b>Опорная стойка на рад. отметке 45К, высотной отметке +45,63</b>			
Тензометр Sg-OC1-45К-1(29)	-19,4 МПа	-13,5 МПа	0...50 МПа (предельное состояние) 5...20МПа (предотказное состояние)
<b>Опорная стойка на рад. отметке 46К, высотной отметке +45,63</b>			
Тензометр Sg-OC1-46К-1(42)	-17,2 МПа	-14,8 МПа	0...50 МПа (предельное состояние) 5...20МПа (предотказное состояние)
<b>Опорная стойка на рад. отметке 50К, высотной отметке +45,63</b>			
Тензометр Sg-OC1-50К-1(26)	-3,7 МПа	-4,7 МПа	-10...20МПа (предельное состояние) -2...5 МПа (предотказное состояние)
<b>Опорная стойка на рад. отметке 51К, высотной отметке +45,63</b>			
Тензометр Sg-OC1-51К-1(43)	-4,1 МПа	-0,2 МПа	-10...20МПа (предельное состояние) -2...5 МПа (предотказное состояние)
<b>Радиальная ферма 46К и +6,81 от оси В на высотной отметке +59,81</b>			
Тензометр Sg-РФ-46К-1в(44)	-1,7	0,2	-10...20МПа (предельное состояние) -2...5 МПа (предотказное состояние)
<b>Радиальная ферма 46К и +6,81 от оси В на высотной отметке +50,632</b>			
Тензометр Sg-РФ-46К-1в(45)	-2,8	-3,9	-10...20МПа (предельное состояние) -2...5 МПа (предотказное состояние)

Примечание. Отрицательный знак в измеренных значениях означает сжатие, положительный – растяжение.



## Литература

- [1]. Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges // Structural Control Health Monitoring. 2011. Vol. 19. Pp. 565-578. doi: 10.1002/stc.448.
- [2]. Розенберг Е.Н. Цифровая железная дорога – ближайшее будущее // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 10. С. 4-7.
- [3]. Efanov D., Osadtchy G., Sedykh D., Pristensky D., Barch D. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14-17, 2016, pp. 201-208, doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
- [4]. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. 171 с.
- [5]. Марлей В.Е., Макшанов А.В., Гарибин П.А., Ольховик Е.О., Олейник А.Ю. Информационная система мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе интернет-технологий и микроконтроллеров // Автоматика на транспорте. 2017. Том 3. №1. С. 54-68.
- [6]. Belyi A.A., Karapetov E.S., Efimenko Yu.I. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example) // Procedia Engineering. V. 189, 2017. p. 145-151. PII:S1877-7058(17)32145-8. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.024
- [7]. Белый А.А. Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2. С. 64-74.
- [8]. Журавлева Л.М., Богачев А.П., Яцкивский Н.В. Снижение аварийных рисков с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения // Мир транспорта. 2017. Т.15, № 3. С. 206-212.
- [9]. Григоренко Н.И., Янчук Е.Е. Диагностика состояния автодороги с помощью беспилотного летательного аппарата // Мир транспорта. 2017. Т.15, № 3. С. 86-92.
- [10]. Comisu C.C., Taranu N., Boaca G., Scutaru M.-C. Structural Health Monitoring System of Bridges // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199.p. 2054-2059, doi:10.1016/j.proeng.2017.09.472
- [11]. Alonso L., Barbarán J., J., Díaz M., Llopis L., Rubio B. Middleware and Communication Technologies for Structural Health Monitoring of Critical Infrastructures: A Survey // Computer Standards & Interfaces. 2018. Vol. 56. Pp. 83-100, doi: 10.1016/j.csi.2017.09.007
- [12]. Yi T.-H., Huang H.-B., Li H.-N. Development of Sensor Validation Methodologies for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review // Measurement. 2017. Vol. 109. Pp. 200-2014, doi: 10.1016/j.measurement.2017.05.064.
- [13]. Efanov D., Sedykh D., Osadtchy G., Barch D. Permanent Monitoring of Railway Overhead Catenary Poles Inclination // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 –October 2, 2017, pp. 163-167, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110142.
- [14]. Li J and Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. Mech Syst Signal Pr 2015; 60–61: 124–150.
- [15]. Ana Paula Camargo Larocca , João Olympio De Araújo Neto, Jorge Luiz Alves Trabanco, Augusto César Barros Barbosa, André Luiz Barbosa Nunes Da Cunha, Ricardo Ernesto Schaal. Uso de receptores GPS de 100 HZ na detecção de deflexões verticais milimétricas de pontes de concreto de pequeno porte [The use of GPS at a rate of 100 HZ to detect millimetric vertical deflections of small sized concrete bridges] .

## References

- [1]. Bonessio N., Lomiento G., Benzoni G. Damage Identification Procedure for Seismically Isolated Bridges. Structural Control Health Monitoring. 2011. Vol.19. Pp. 565-578. Doi: 10.1002/stc.448.
- [2]. Rozenberg Ye.N. Tsifrovaya zheleznaya doroga – blizhaysheye budushcheye [Digital railway - the nearest future]. Automation, Communication, Computer Science. 2016. No.10. Pp. 4-7. (rus)
- [3]. Efanov D., Osadtchy G., Sedykh D., Pristensky D., Barch D. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines. Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). Yerevan, Armenia, October 14-17, 2016. Pp. 201-208. Doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
- [4]. Yefanov D.V. Funktsionalnyy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional control and monitoring of railway automation and telemechanics devices: monography]. Saint Petersburg: FGBOU VO PGUPS, 2016. 171 p. (rus)
- [5]. Marley V.Ye., Makshanov A.V., Garibin P.A., Olkhovik Ye.O., Oleynik A.Yu. Informatsionnaya sistema monitoringa deformatsiy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na osnove internet-tehnologiy i mikrokontrollerov [Information system for monitoring deformations of hydraulic structures based on Internet technologies and microcontrollers]. Automation in Transport. 2017. Vol.3. No.1. Pp. 54-68. (rus)
- [6]. Belyi A.A., Karapetov E.S., Efimenko Yu.I. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example). Procedia Engineering. Vol.189. 2017. Pp. 145-151. PII: S1877-7058(17)32145-8. Doi:10.1016/j.proeng.2017.05.024.
- [7]. Belyy A.A. Veroyatnostnoye prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruyemykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy megapolisa [Probabilistic prediction of the technical condition of the exploited reinforced concrete bridge structures in megalopolis]. Bulletin for Civil Engineers. 2017. No.2. Pp. 64-74. (rus)
- [8]. Zhuravleva L.M., Bogachev A.P., Yatskiivskiy N.V. Snizheniye aviariynykh riskov s pomoshchyu sistem intellektualnogo videonablyudeniya [Reduction of emergency risks with the help of intelligent video surveillance systems]. The World of Transport. 2017. Vol.15. No.3. Pp. 206-212. (rus)
- [9]. Grigorenko N.I., Yanchuk Ye.Ye. Diagnostika sostoyaniya avtodorogi s pomoshchyu bespilotnogo letatel'nogo apparata [Diagnostics of road condition with the help of an unmanned aerial vehicle]. The World of Transport. 2017. Vol.15. No.3. Pp. 86-92. (rus)
- [10]. Comisu C.-C., Taranu N., Boaca G., Scutaru M.-C. Structural Health Monitoring System of Bridges. Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 2054-2059. Doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.472.
- [11]. Alonso L., Barbarán J., J., Díaz M., Llopis L., Rubio B. Middleware and Communication Technologies for Structural Health Monitoring of Critical Infrastructures: A Survey. Computer Standards & Interfaces. 2018. Vol. 56. Pp. 83-100. Doi: 10.1016/j.csi.2017.09.007.
- [12]. Yi T.-H., Huang H.-B., Li H.-N. Development of Sensor Validation Methodologies for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review. Measurement. 2017. Vol. 109. Pp. 200-2014. Doi: 10.1016/j.measurement.2017.05.064.
- [13]. Efanov D., Sedykh D., Osadtchy G., Barch D. Permanent Monitoring of Railway Overhead Catenary Poles Inclination. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. Pp. 163-167. Doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110142.
- [14]. Li J and Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. 60–61: 124–150.

- Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 21, no 2, p.290-307, abr-jun, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200017>
- [16]. Lienhart, W., Ehrhart, M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation - Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2015 DOI: 10.12783/SHM2015/58
- [17]. Mustafa Furkan, Qiang Mao, Matteo Mazzetti, John DeVitis, S. Paul Sumitro, Fred Faridazar, A. Emin Aktan, Franklin Moon, Ivan Bartoli. An investigation on wireless sensors for asset management and health monitoring of civil structures. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2016, edited by Jerome P. Lynch, Proc. of SPIE Vol. 9803, 98033E doi: 10.1117/12.2218908.
- [18]. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors Volume 2016 (2016), Article ID 7494817, 14 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>
- [19]. Yang Y. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. // Y. Yang, Q. S. Li, B. W. Yan. Advances in Mechanical Engineering. 017. Vol. 9 (1). p. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
- [20]. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. Procedia Engineering 188 ( 2017 ) 340 – 347
- [21]. Wenzel H. Health monitoring of bridges // Chichester: John Wiley & Sons, 2009. 621 p.
- [22]. Яшнов А.Н. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске. // А.Н. Яшнов, Т.М. Баранов. Вестник Томского
- [23]. Belyi A.A. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example). // A.A. Belyi, E.S. Karapetov, Yu. S. Efimenko. Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. Pp.145-151. PII:S1877-7058(17)32145-8 DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.024
- [24]. Хиллер Б. Исследование автоматизированной системы деформационного мониторинга шлюзовых камер. // Б. Хиллер, Х.К. Ямбаев. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. № 3. С. 33-38.
- [25]. Хиллер Б. Цифровые инклинометры в системах автоматизированного геодезического мониторинга деформаций // Б. Хиллер. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, № 6, 2015. М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2015. С. 23-30.
- [26]. Брын М.Я. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий. // М.Я. Брын, Е.Г. Толстов, А.А. Никитчин, Б. Резник, А.И. Ященко, О.В. Евстафьев, В.А. Кучумов. – 2009. «Известия Петербургского Университета Путей Сообщения», выпуск 2(19)/ СПб.: ПГУПС, 2009 с.120-128
- [27]. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 28.12.2004 N 2054 о реализации проекта по строительству футбольного стадиона в западной части Крестовского острова.
- [28]. Andersen J.E., Vesterinen A. Structural Health Monitoring Systems. – Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S and Futurec OY, 2006, 126 p.
- [29]. Mustafa Furkan, Qiang Mao, Matteo Mazzetti, John DeVitis, S. Paul Sumitro, Fred Faridazar, A. Emin Aktan, Franklin Moon, Ivan Bartoli. An investigation on wireless sensors for asset management and health monitoring of civil structures. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and
- 124-150.
- [15]. Ana Paula Camargo Larocca , João Olympio De Araújo Neto, Jorge Luiz Alves Trabanco, Augusto César Barros Barbosa, André Luiz Barbosa Nunes Da Cunha, Ricardo Ernesto Schaal. Uso de receptores GPS de 100 HZ na detecção de deflexões verticais milimétricas de pontes de concreto de pequeno porte [The use of GPS at a rate of 100 HZ to detect millimetric vertical deflections of small sized concrete bridges] . Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba. Vol. 21. No.2. Pp.290-307. Abr-jun, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200017>
- [16]. Lienhart, W., Ehrhart, M. State of the art of geodetic bridge monitoring. Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation. Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring. IWSHM, 2015. Doi: 10.12783/SHM2015/58.
- [17]. Mustafa Furkan, Qiang Mao, Matteo Mazzetti, John DeVitis, S. Paul Sumitro, Fred Faridazar, A. Emin Aktan, Franklin Moon, Ivan Bartoli. An investigation on wireless sensors for asset management and health monitoring of civil structures. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. 2016. Edited by Jerome P. Lynch, Proc. of SPIE. Vol. 9803, 98033E. Doi: 10.1117/12.2218908.
- [18]. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique. Journal of Sensors Volume. 2016 (2016). Article ID 7494817, 14 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
- [19]. Yang Y., Li Q.S., Yan B.W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9 (1). Pp. 1–10. Doi: 10.1177/1687814016684272.
- [20]. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. Procedia Engineering. Vol.188. 2017. Pp. 340 – 347.
- [21]. Wenzel H. Health monitoring of bridges. H. Wenzel. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. 621 p.
- [22]. Yashnov A.N. Nekotoryye rezultaty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez r. Angaru v Irkutsk [Some results of the dynamic monitoring system of the academic bridge across the Angara river in Irkutsk]. A.N. Yashnov, T.M. Baranov. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. (rus)
- [23]. Belyi A.A., Karapetov E.S., Efimenko Yu. S. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example). Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. Pp.145–151. PII:S1877-7058(17)32145-8. Doi:10.1016/j.proeng.2017.05.024.
- [24]. Khiller B., Yambayev Kh.K. Issledovaniye avtomatizirovannoy sistemy deformatsionnogo monitoringa shlyuzovykh kamer [Investigation of automated system of deformational monitoring of lock chambers]. Proceedings of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography. 2016. No.3. Pp. 33-38. (rus)
- [25]. Khiller B. Tsifrovyye inklinometry v sistemakh avtomatizirovannogo geodezicheskogo monitoringa deformatsiy [Digital inclinometers in automated geodetic strain monitoring systems]. Proceedings of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography. No. 6. 2015. Moscow: Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2015. Pp. 23-30. (rus)
- [26]. Bryn M.Ya., Tolstov Ye.G., Nikitchin A.A., Rezник B., Yashchenko A.I., Yevstafiyev O.V., Kuchumov V.A. Geodezicheskiy monitoring deformatsiy vantovykh mostov na osnove sputnikovoykh tekhnologiy [Geodetic monitoring of deformations of cable-stayed bridges on the basis of satellite technologies]. 2009. Proceedings of Saint Petersburg Transport University. Ed. 2(19). Saint Petersburg: PGUPS, 2009. Pp.120-128. (rus)
- [27]. Postanovleniye Pravitelstva Sankt-Peterburga ot 28.12.2004 N 2054 o realizatsii proyekta po stroitelstvu futbolnogo stadiona v zapadnoy chasti Krestovskogo ostrova [Decree of Saint

Aerospace Systems 2016, edited by Jerome P. Lynch, Proc. of SPIE Vol. 9803, 98033E DOI: 10.1117/12.2218908.

- [30]. Yang Y. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. // Y. Yang, Q. S. Li, B. W. Yan. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9 (1). p. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
- [31]. Самитов Р.А. Системотехника инженерного мониторинга сложных строительных сооружений. М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2001, 248 с.
- [32]. Яшнов А.Н., Баранов Т.М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. №1. С. 199-209.
- Petersburg City Government No. 2054 as of December 28, 2004 on the implementation of the project for the construction of a football stadium in the western part of the Krestovsky Island]. (rus)
- [28]. Andersen J.E., Vesterinen A. *Structural Health Monitoring Systems*. Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S and Futurec OY, 2006. 126 p.
- [29]. Mustafa Furkan, Qiang Mao, Matteo Mazzetti, John DeVitis, S. Paul Sumitro, Fred Faridazar, A. Emin Aktan, Franklin Moon, Ivan Bartoli. An investigation on wireless sensors for asset management and health monitoring of civil structures. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2016. Edited by Jerome P. Lynch. *Proceedings of SPIE*. Vol. 9803, 98033E. Doi: 10.1117/12.2218908.
- [30]. Yang Y., Li Q.S., Yan B.W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9 (1). Pp. 1–10. Doi: 10.1177/1687814016684272.
- [31]. Samitov R.A. *Sistemotekhnika inzhenernogo monitoringa slozhnykh stroitelnykh sooruzheniy* [System techniques of engineering monitoring of complex building structures]. Moscow: New Millennium Fund, 2001. 248 p. (rus)
- [32]. Yashnov A.N., Baranov T.M. *Nekotoryye rezultaty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez r. Angaru v Irkutske* [Some results of the dynamic monitoring system of the academic bridge across the Angara river in Irkutsk]. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017. No.1. Pp. 199-209. (rus)

#### Контактная информация

1. +7(921)3081145, osgerman@mail.ru (Осадчий Герман Владимирович, технический директор)
2. +7(921)3156911, andbeliy@mail.ru (Белый Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой)
3. +7(911)7092164, TrES-4b@yandex.ru (Ефанов Дмитрий Викторович, д.т.н., доцент)
- 4.\* +7(906)2565460, diamond0110@mail.ru (Шестовицкий Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент)

#### Contact information

1. +7(921)3081145, osgerman@mail.ru (German Osadchy, Technical Director)
2. +7(921)3156911, andbeliy@mail.ru (Andrei Belyi, Ph.D., Associate Professor, Acting Head of Department)
3. +7(911)7092164, TrES-4b@yandex.ru (Dmitry Efanov, Ph.D., Associate Professor)
- 4.\* +7(906)2565460, diamond0110@mail.ru (Dmitriy Shestovitskiy, Ph.D., Associate Professor)

© Осадчий Г.В., Белый А.А., Ефанов Д.В., Шестовицкий Д.А. 2018