

УДК 624.21.01/.09 + 620.1.051

**А. А. Белый, канд. техн. наук**

Кафедра «Мосты»,  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

**А. А. Белов**

АО «НПП «Промтрансавтоматика»»

**Г. В. Осадчий, О. В. Осетинский**

ООО «НТЦ «Комплексные системы мониторинга»»

**К. Ю. Долинский**

ЗАО «НТЦ «Мониторинг мостов»»

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА**

Описывается разработанная авторами статьи концепция мониторинга искусственных дорожных сооружений Санкт-Петербурга с применением автоматизированных технологий. Предполагается последующая разработка на ее основе рабочей документации на систему автоматизированного мониторинга моста Александра Невского. Концепция была подготовлена по результатам всестороннего и систематического анализа объектов транспортной инфраструктуры города. Выполнено исследование функционирования систем автоматизации на сооружениях Санкт-Петербурга, их эволюционного развития и трансформации к единичным системам инструментального мониторинга. Впервые обосновывается необходимость применения средств мониторинга для парка искусственных сооружений. На основе детального обследования объектов города (более 700) сформулированы критерии и сформированы группы транспортных объектов, позволяющие выделить около 100 сооружений, которые должны оснащаться средствами мониторинга. В основе работы систем инструментального мониторинга лежат физические законы и алгоритмы автоматизации. Важнейшие используемые подсистемы (контроля напряженно-деформированного состояния, вибрационной диагностики, контроля углов поворота и наклонов элементов) описаны в тексте статьи. Показаны типовые схемы сооружений и их элементов с расположенными на них средствами мониторинга.

мониторинг искусственных сооружений; объект транспортной инфраструктуры; управление техническим состоянием; автоматизация процессов; напряженно-деформированное состояние

## Введение

Системы инструментального мониторинга (structural health monitoring systems) давно и прочно вошли в инженерный обиход. Их повсеместное использование обусловлено значительным прогрессом в области информационных технологий, наблюдающимся по всему миру в течение последних 30–40 лет.

Мониторинг как инструмент научных исследований впервые начал использоваться в 1970-е гг. Первоначально под мониторингом подразумевалась система наблюдений за окружающей средой, контролирующая процессы взаимодействия природы и человека. В работах и научных исследованиях, посвященных природоохранному и экологическим вопросам, мониторинг быстро становится одним из самых употребляемых понятий [1]. В настоящее время функционируют разнообразные системы экологического мониторинга постоянных наблюдений в пространстве и во времени за техногенными изменениями природной среды и контроль ее состояния при хозяйственной деятельности разного рода [2].

Общие принципы экологического мониторинга послужили, в частности, основой для создания инженерного мониторинга как нового направления в области эксплуатации сложных строительных сооружений, к числу которых относятся искусственные дорожные сооружения [3, 4].

Обеспечение устойчивой эксплуатации требует постоянного наблюдения за появлением тех или иных дефектов и повреждений элементов объекта и прогнозирования возможного их развития до того, как они превратятся в дефекты и повреждения, угрожающие надежности и долговечности сооружения.

Различают два основных вида мониторинга: в процессе строительства и в эксплуатационный период, их задачи существенно различаются. Если первый контролирует напряженно-деформируемое состояние сооружения в период возведения, когда в конструкциях возникают непроектные усилия, то эксплуатационный мониторинг предназначен в основном для контроля за техническим состоянием сооружения под воздействием негативных факторов в процессе его существования.

В нашем случае, употребляя термин «мониторинг», мы подразумеваем именно мониторинг в эксплуатационный период.

Приведем примеры инновационных подходов к управлению техническим состоянием искусственных сооружений, систем мониторинга за рубежом и в России (в частности, в Санкт-Петербурге).

Мировой опыт внедрения систем мониторинга весьма обширен [5–13]. В России за последние годы подобными системами оборудованы многие объекты транспортной инфраструктуры [14–20]. Можно выделить ряд публикаций, касающихся мониторинга городских сооружений [3, 15, 21–24].

Коснулись эти нововведения и Санкт-Петербурга, являющегося своеобразным музеем мостов, обладателем парка искусственных сооружений, чьи архитектурные и технические особенности признаны во всем мире [25].

В 2017 г. старейшая эксплуатирующая организация в области управления техническим состоянием транспортных сооружений СПб ГБУ «Мостотрест» приняла решение разработать концепцию мониторинга искусственных дорожных сооружений Санкт-Петербурга с применением автоматизированных технологий с последующей разработкой на ее основе рабочей документации на систему автоматизированного мониторинга моста Александра Невского (далее – концепция мониторинга) [26]. Был объявлен конкурс на выполнение работ и услуг, который выиграла компания АО «НПП «Промтрансавтоматика»». Для обеспечения высококачественного и своевременного оказания услуг в соответствии с государственным контрактом к работе в качестве экспертов и соразработчиков были привлечены специалисты данной отрасли, в том числе авторы настоящей статьи. Работа состояла из трех этапов. В данной статье описываются ее основные положения, так как по сути она явилась научно-исследовательской работой, позволяющей осветить некоторые вопросы в области мониторинга искусственных сооружений и процесса автоматизации содержания объектов мостового парка Санкт-Петербурга.

## **1 Развитие систем автоматизации на транспортных объектах Санкт-Петербурга. Анализ объектов и обоснование решений**

В ходе разработки концепции мониторинга был проведен ряд мероприятий по анализу развития систем автоматизации сооружений в Санкт-Петербурге, а также их текущего состояния. Последовательность и порядок выполнения работ по контракту представлены на рис. 1.

Изложим суть выполненной работы.

В число искусственных сооружений Санкт-Петербурга входит множество самых разнообразных по материалам и статическим схемам конструкций [25, 26]. Срок службы многих из них сопоставим с возрастом самого города. Несмотря на эстетическую ценность искусственных сооружений, это прежде всего транспортные сооружения, основная цель которых – обеспечивать постоянное, безопасное и бесперебойное движение по магистралям, которые они соединяют. Соответственно речь идет об эксплуатации мостового парка в целом. Важно не сохранять каждый отдельный мост, а относиться к нему как к единице мостового парка. Каждый из них должен служить возможно дольше, а мостовой парк в целом должен эксплуатироваться постоянно [27–29].

Нет необходимости содержать мосты по 120–150 лет. Такую долговечность можно технически обеспечить, но экономически это нецелесообразно.

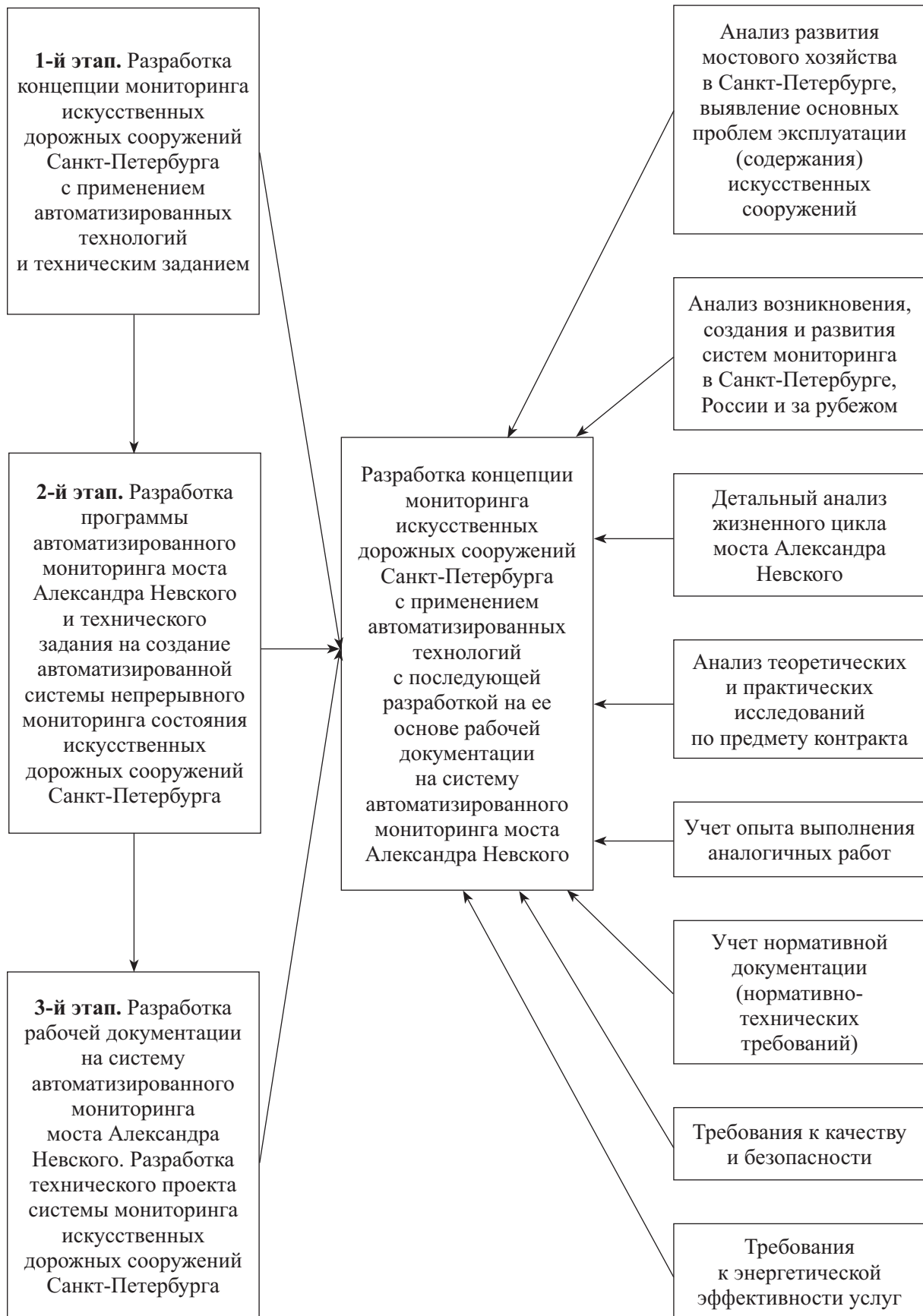


Рис. 1. Блок-схема последовательности и порядка выполнения работ



Гораздо выгоднее обеспечить безопасную эксплуатацию и пропуск нагрузки на должном уровне, т. е. самую главную функцию сооружения в течение так называемого оптимального периода. Этот период, согласно расчетам [30], не превышает в условиях Санкт-Петербурга 65–70 лет (железобетонные мостовые сооружения).

Помимо использования при содержании мостов современного оборудования [31], позволяющего поддерживать необходимый уровень надежности и функциональности, требуется постоянное совершенствование системы эксплуатации, что, в свою очередь, требует повышенного внимания и ресурсов (материальных и интеллектуальных).

Требуется использование современных способов и средств контроля за техническим состоянием сооружений, подпадающих под термин «инновационные».

С целью повышения уровня охраны сооружений на разводных мостах начиная с 1990-х гг. установлены комплексные системы защиты и видеонаблюдения (рис. 2), которые позволяют с пульта управления и поста охраны контролировать наличие автотранспорта и пешеходов перед разводкой мостов, а также предупреждать несанкционированные проникновения на мосты и в служебные помещения, порчу имущества и оборудования. Радиолокационная система позволяет диспетчеру контролировать проход судов по Неве в ночное время по створам разведенных пролетов. Это крайне необходимо



**Рис. 2.** Система радиолокационного контроля, охраны и видеонаблюдения на Троицком мосту

в нештатных ситуациях с навалом судов на опоры мостов (рис. 3). Подсистема радиолокационного и визуального контроля прохождения судов по фарватеру Невы позволяет определить параметры плавсредства (габариты, точные географические координаты местоположения, скорости и направления движения) в реальном масштабе времени, отображает текущее местоположение плавсредства в онлайн-режиме на электронной карте с привязкой к географическим координатам. Производятся запись, архивация информации, ведется база данных тревожных событий.



**Рис. 3.** Судно после навала на опору Троицкого моста

В настоящее время системы видеонаблюдения и охраны получили весьма обширное распространение в силу относительной простоты эксплуатации и существенных преимуществ при содержании сооружения.

Система автоматизированного контроля разводки мостов охватывает следующие мосты: Володарский, Александра Невского, Большеохтинский, Литейный, Троицкий, Дворцовый, Благовещенский, Биржевой, Тучков. Система обеспечивает диспетчерский контроль электроснабжения и мониторинг работы технологического оборудования для разводки мостов, а также передачу видеоинформации с камер технологического видеонаблюдения мостов. На некоторых мостах система обеспечивает контроль и передачу в диспетчерскую сигналов тревоги с систем охранно-тревожной и пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения.

Диспетчерский пункт системы располагается в административном здании СПб ГБУ «Мостотрест» по адресу: Индустриальный пр., 42 (рис. 4). Доступ





Рис. 4. Помещение диспетчерского пункта СПб ГБУ «Мостотрест»

к данным системы обеспечивается через локальную вычислительную сеть СПб ГБУ «Мостотрест», в том числе и удаленно из помещения участка эксплуатации разводных мостов, расположенного по адресу: Орловский пер., 4.

Автоматизированная система обеспечения безопасности движения в тоннелях охватывает следующие объекты:

- левобережный транспортный тоннель у Литейного моста;
- правобережный транспортный тоннель у Литейного моста;
- тоннель транспортного узла правобережного съезда с Литейного моста;
- транспортный тоннель у Гренадерского моста;
- транспортный тоннель на Южном шоссе;
- насосная станция путепроводов на пересечении дороги к аэропорту с Пулковским шоссе;
- транспортный тоннель на Пулковском шоссе;
- путепровод тоннельного типа на Пироговской набережной;
- насосная станция железнодорожной развязки на Лиговском проспекте;
- подземный пешеходный переход на Митрофаньевском шоссе;
- подземный пешеходный переход под Приморским проспектом (у 3-го Елагина моста).

Даная система обеспечивает диспетчерский контроль электроснабжения и мониторинг работы технологического оборудования канализацион-

ных насосных станций, вентиляции и наружного освещения транспортных тоннелей и подземных пешеходных переходов. Система предусматривает возможность дистанционного управления устройствами автоматического ввода резерва питания и насосным оборудованием. На некоторых объектах в систему включены датчики охранно-тревожной и пожарной сигнализации. На недавно оборудованных объектах (правобережный транспортный тоннель у Литейного моста, тоннель транспортного узла правобережного съезда с Литейного моста, тоннель на Пироговской набережной) обеспечивается передача видеоинформации с камер технологического видеонаблюдения.

Диспетчерский пункт системы совмещен с диспетчерским пунктом системы «Разводные мосты Санкт-Петербурга» и располагается в административном здании СПб ГБУ «Мостотрест».

Система диспетчеризации подъемного оборудования надземных пешеходных переходов охватывает следующие объекты (пешеходные переходы):

- № 1 напротив улицы Оскаленко;
- № 2 на Приморском проспекте;
- в створе Стародеревенской улицы;
- у улицы Савушкина;
- у Яхтенной улицы.

Система обеспечивает диспетчерский контроль работы подъемного оборудования и управление доступом к подъемным платформам надземных пешеходных переходов для маломобильных групп населения, включая передачу видеоинформации с камер видеонаблюдения и двухстороннюю речевую связь пользователя подъемного оборудования с диспетчером.

Диспетчерский пункт системы оборудован в подземном пешеходном переходе под Приморским проспектом (у 3-го Елагина моста). Информация системы дублируется и хранится в диспетчерском пункте, совмещенном с диспетчерским пунктом системы «Разводные мосты Санкт-Петербурга» и расположенном в административном здании СПб ГБУ «Мостотрест».

В качестве еще одного примера можно привести подводный транспортный тоннель под Морским каналом, ведущим на Канонерский остров, где, наряду с системой видеонаблюдения и охраны, установлена система регистрации данных о техническом состоянии и работоспособности оборудования и электрических сетей (рис. 5). Автономная система мониторинга и управления инженерными системами Канонерского транспортного тоннеля обеспечивает мониторинг работы и дистанционное управление инженерными системами тоннеля (насосные станции, система вентиляции, освещение), технологическое видеонаблюдение. Диспетчерский пункт системы располагается в техническом здании Канонерского тоннеля.

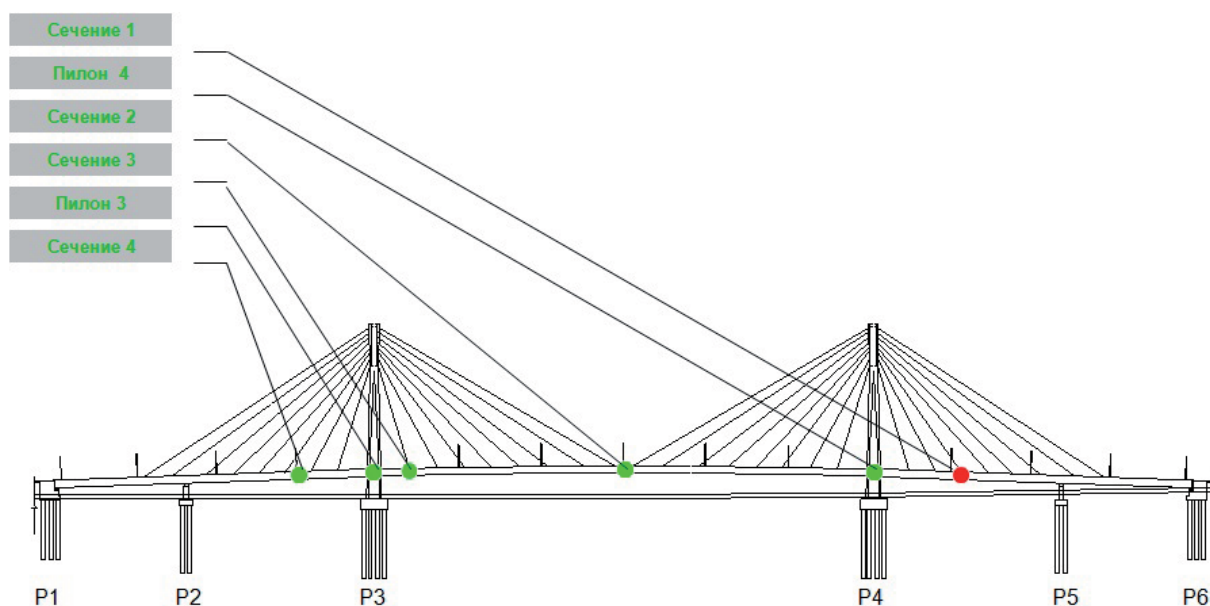
Система эксплуатационного мониторинга путепровода через железнодорожные пути станции Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский в створе



**Рис. 5.** Система видеонаблюдения и охраны в Канонерском транспортном тоннеле

проспекта Александровской Фермы обеспечивает мониторинг строительных конструкций путепровода и технологическое видеонаблюдение (рис. 6).

Подобные системы приносят огромную пользу при содержании сооружений, поскольку повышают эффективность процесса эксплуатации за счет уменьшения трудозатрат (а равно и материальных ресурсов) на охрану



**Рис. 6.** Мониторинг состояния конструкций путепровода в створе пр. Александровской Фермы



сооружения. Кроме того, как уже говорилось, значительно упрощается процесс расследования случаев аварий на искусственных сооружениях. Вместе с тем данные системы уже далеко не новинка. Их использование началось в середине 1990-х гг., они совершенствуются.

В настоящее время в Санкт-Петербурге более 700 искусственных сооружений, находящихся на техническом содержании СПб ГБУ «Мостотрест» [26]. Ввиду того, что значительная их часть выполнена по индивидуальным проектам и представляют они собой сложные по конструкции сооружения, а в отдельных случаях особо опасные, уникальные и технически сложные (Градостроительный кодекс РФ, ст. 48.1), очевидна необходимость специальных подходов к управлению их техническим состоянием (содержанию).

Эксплуатация зданий, сооружений должна осуществляться в соответствии с требованиями технических регламентов, проектной документации, нормативных правовых актов Российской Федерации, нормативных правовых актов субъектов Российской Федерации и муниципальных правовых актов. В целях безопасности зданий, сооружений в процессе их эксплуатации должны обеспечиваться техническое обслуживание зданий, сооружений, эксплуатационный контроль, текущий ремонт зданий, сооружений (Градостроительный кодекс РФ, ст. 55.24).

Эксплуатационный контроль за техническим состоянием зданий, сооружений проводится в период эксплуатации таких зданий, сооружений путем осуществления периодических осмотров, контрольных проверок и (или) мониторинга состояния оснований, строительных конструкций, систем инженерно-технического обеспечения и сетей инженерно-технического обеспечения в целях оценки состояния конструктивных и других характеристик надежности и безопасности зданий, сооружений (Градостроительный кодекс РФ, ст. 55.24; ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», ст. 36).

Техническое обслуживание зданий, сооружений, текущий ремонт зданий, сооружений проводится в целях обеспечения их надлежащего технического состояния, т. е. поддержания параметров устойчивости, надежности зданий, сооружений, исправности строительных конструкций, систем инженерно-технического обеспечения, сетей инженерно-технического обеспечения, их элементов (Градостроительный кодекс РФ, ст. 55.24).

В п. 5.96 СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84\* прямо указывается, что в необходимых случаях в проектах с целью оценки фактической работы мостовых конструкций следует предусматривать мониторинг напряженно-деформированного состояния мостов, т. е. систему длительного контроля за их состоянием и поведением в процессе строительства (реконструкции) и эксплуатации в соответствии с ГОСТ Р 22.1.12–2005.



Мониторинг необходим:

– при строительстве и эксплуатации больших<sup>1</sup> и сложных по конструкции мостов;

– для металлических и железобетонных конструкций, в которых применено их дополнительное предварительное напряжение (регулирование усилий);

– для мостов с внешне статически неопределимыми конструкциями, в которых возможно появление дополнительных усилий, деформаций и осадок из-за геологических, гидрологических, оползневых и сейсмических явлений;

– для железобетонных конструкций, в которых возможна большая неопределенность длительных процессов, связанных с ползучестью, усадкой и температурными деформациями (разные возрасты бетона, сочетание сборных и монолитных конструкций и т. п.).

Кроме того, ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» рассматривает мониторинг (мониторинг состояния основания, строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения) как одно из мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации сооружения (ст. 15, 36).

Проектируемые мероприятия по обеспечению безопасности должны быть основаны:

- 1) на результатах исследований;
- 2) или расчетах, или (и) испытаниях, выполненных по сертифицированным либо апробированным иным способом методикам;
- 3) или моделировании сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений, или (и) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;
- 4) или оценке риска возникновения опасных природных процессов и явлений, или (и) техногенных воздействий;
- 5) или сочетании вышеперечисленного.

Как видно из положений ФЗ-384, налицо необходимость применения систем мониторинга на тех объектах, где безопасность строительства или эксплуатации невозможно обеспечить иными способами и при этом мероприятия по обеспечению безопасности в полной мере обоснованы.

---

<sup>1</sup> Малые мосты – длиной до 25 м включительно, средние мосты – длиной от 25 м до 100 м включительно, большие мосты – длиной свыше 100 м. Автомобильные, в том числе городские, мосты длиной менее 100 м, но пролетами свыше 60 м также относятся к большим мостам (СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84\*, п. 5.7).

В соответствии с п. 4.4 ГОСТ 22.1.12–2005 объектами контроля угроз возникновения аварий, чрезвычайных ситуаций должны являться подсистемы жизнеобеспечения и безопасности:

- теплоснабжение;
- вентиляция и кондиционирование;
- водоснабжение и канализация;
- электроснабжение;
- газоснабжение;
- инженерно-технический комплекс пожарной безопасности объекта;
- лифтовое оборудование;
- система связи и оповещения;
- системы охранной сигнализации, видеонаблюдения, контроля и управления доступом, средства досмотра;
- системы обнаружения повышенного уровня радиации, аварийных химически опасных веществ, биологически опасных веществ, значительной концентрации токсичных и взрывоопасных концентраций газозвоздушных смесей и др.).

Объектами контроля угроз возникновения аварий, чрезвычайных ситуаций должны являться технологические системы, а также основания, строительные конструкции зданий и сооружений; сооружения инженерной защиты, зоны возможных сходов селей, оползней, лавин в зоне эксплуатации объекта.

В соответствии с п. 4.9 ГОСТ 22.1.12–2005 автоматизированные системы мониторинга подлежат обязательной установке, в том числе, на объектах капитального строительства, в проектной документации которых предусмотрена хотя бы одна из следующих характеристик:

- высота более 100 м;
- пролеты более 100 м;
- наличие консоли более 20 м;
- заглубление подземной части (полностью или частично) ниже планировочной отметки земли более чем на 10 м;
- наличие конструкций и конструктивных систем, в отношении которых применяются нестандартные методы расчета с учетом физических или геометрических нелинейных свойств либо разрабатываются специальные методы расчета.

Таким образом, при анализе потенциальных объектов мониторинга выявлено несколько характерных групп объектов, полностью или частично относимых к объектам, оснащаемым автоматизированной системой мониторинга.

*Первая группа* объектов – это искусственные дорожные сооружения, относимые, в соответствии с СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84\*, к большим мостам. Преимущественно в эту группу включены разводные, неразводные мосты и путепроводы.

*Вторая группа* объектов – транспортные тоннели. Объекты являются сложными по конструкции, безопасность их эксплуатации с использованием систем мониторинга существенно повышается. Анализ рисков развития чрезвычайных ситуаций по данным сооружениям и объектам-аналогам [24] с использованием нормативов (ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем) и научных исследований [32–34] подтверждает такую необходимость.

*Третья группа* объектов – это пешеходные тоннели, насосные станции, подъемное оборудование и прочие инженерные сети на объектах транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. Элементами контроля преимущественно являются именно коммуникации и инженерные сети объектов (так называемая система мониторинга инженерных систем).

*Четвертая группа* – прочие объекты. Сооружения, имеющие относительно небольшую протяженность, но являющиеся сложными по конструкции либо претерпевшие в процессе своего жизненного цикла аварийные или близкие к ним ситуации. Экспресс-анализ рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на таких объектах подтверждает необходимость наличия автоматизированных систем мониторинга для обеспечения безопасности их эксплуатации. Это плотины, мосты меньше 100 м, сложные конструкции.

Из вышесказанного видно, что потенциальные объекты мониторинга имеют некоторые закономерности в привязке к транспортной инфраструктуре города:

- мосты размещаются на реке Неве и по рукавам ее дельты;
- наблюдается концентрация разнородных объектов (мосты, транспортные тоннели, пешеходные переходы) вдоль северного берега дельты Невы (Свердловская набережная, Пироговская набережная, Ушаковская набережная, Приморский проспект, улица Савушкина, Приморское шоссе);
- повышенная плотность размещения потенциальных объектов мониторинга наблюдается вдоль основных радиальных (Лиговский – Московский проспекты – Пулковское шоссе, Витебский проспект, проспект Стачек – проспект Маршала Жукова – Таллинское шоссе) и кольцевых магистралей города (набережная Обводного канала, Ивановская улица – проспект Славы).

Всего в Концепцию мониторинга включено более 100 объектов.

## 2 Измеряемые параметры

В качестве контролируемых параметров могут использоваться величины, получаемые путем прямых измерений или косвенно, на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

При мониторинге строительных конструкций транспортных сооружений предусматривается определение необходимых параметров различных частей объектов. Мониторингу подлежат элементы сооружения, подверженные наибольшим нагрузкам и наибольшим изменениям состояния в процессе строительства и эксплуатации, – опоры и пролетные строения.

Основными параметрами, подлежащими мониторингу, являются:

- абсолютное и относительное смещение конструкций;
- динамические параметры, влияющие на износ конструкций;
- напряженно-деформированное состояние элементов конструкций;
- развитие трещин (при наличии).

В соответствии с вышесказанным измеряемые и контролируемые параметры определяются непосредственно для решения следующих задач непрерывного мониторинга:

- деформации (напряжения) в местах, определенных архитектурными решениями и расчетами несущих конструкций;
- колебаний конструкций;
- отклонения конструкций от вертикали;
- смещения элементов конструкций,

а также мониторинга раскрытия трещин (непрерывного или периодического).

Напряженно-деформированное состояние обычно измеряется тензометрическим методом. Для этого существуют специальные датчики – тензометры. С их помощью измеряют деформацию в определенной точке (зоне) элемента конструкции, затем, используя закон Гука, определяют напряжения. Деформации, измеряемые на отрезке, называемом базой  $S$ , при работе в упругой стадии характеризуются малыми значениями. Тензометрами измеряют абсолютное удлинение/укорочение  $\Delta S$  и по ним устанавливают среднюю относительную деформацию:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S}. \quad (1)$$

Для того чтобы средняя относительная деформация точнее отражала истинную, база  $S$  должна быть по возможности меньшей.

При линейном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерить  $\Delta S$  на базе, расположенной по направлению действующего усилия. По полученному значению  $\varepsilon$  и известному модулю упругости  $E$  вычисляют напряжение:

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (2)$$

В случае плоского напряженного состояния в данной точке измеряют деформации в двух или трех направлениях.

Датчики располагаются вдоль главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  либо (если направления главных напряжений неизвестны) один датчик может быть установлен произвольно, а два других под углами 45 и 90° или 60 и 120° к нему. В первом случае (известны направления главных напряжений)  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \\ \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Во втором случае вычисления немного сложнее. Во избежание чрезмерности объема статьи не будем приводить соответствующие формулы.

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

Результаты измерений при динамическом мониторинге позволяют выявить скрытые изменения прочностных свойств конструкций [14]. Таким образом, в задачи динамического мониторинга входят:

- 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.

Решение поставленных в рамках динамического мониторинга задач открывает широкое поле для исследований самих конструкций с оценкой развития в них скрытых повреждений. В связи с этим следует отметить, что в числе основных характеристик любой конструкции – параметры собственных колебаний, представленные в виде набора частот и соответствующих им форм колебаний.

Из динамики сооружений известно уравнение

$$(C - \lambda E)\vec{v} = 0, \quad (4)$$

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 углов и смещений представляет собой следующее. Выполненный авторами анализ поведения деформации упругой линии стержня под влиянием внешних воздействий может быть описан рядом Фурье с использованием тригонометрических полиномов. При этом, как правило, достаточно использовать шесть-восемь членов в зависимости от формы и конструктивных особенностей исследуемого сооружения.

Располагать инклинометры следует в точках пересечения гармоник ряда Фурье с осью стержня.

Форма деформируемого стержня под воздействием внешних факторов определяется функцией, полученной путем решения системы тригонометрических уравнений, в которую в качестве аргументов подставляются данные, полученные с помощью установленных инклинометров.

Длина упругой линии стержня  $L$  будет соответствовать половине пространственного периода первой гармоники ряда Фурье. Следовательно, длина этого периода равна  $2L$ , и длины периодов  $T_i$  всех гармоник ряда определяются выражением

$$T_i = \frac{2L}{i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Тригонометрический полином в данном случае принимает вид

$$y(x) = y_0 + \sum_{i=1}^n \left( y_{si} \sin \frac{\pi i x}{L} + y_{ci} \cos \frac{\pi i x}{L} \right). \quad (6)$$

Датчики целесообразно устанавливать в точках, где фигурирующие в (6) функции – синус и косинус – принимают нулевые значения. Абсциссы таких точек на упругой линии балки для любых гармоник можно найти по формуле

$$x_{ik} = \frac{kL}{2i}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 0, \dots, 2i. \quad (7)$$

Таким образом, в системе мониторинга присутствуют абсолютно разные физические параметры, обработка которых интегрально, в совокупности, позволяет получить достоверную картину о техническом состоянии сооружений. На современном этапе развития автоматизации и электроники все передаваемые сигналы представляют собой поток информационных векторов, обработка которых производится с использованием актуальных теорий и практических рекомендаций [35, 36].

Типовые схемы точек контроля параметров различны в зависимости от принадлежности объекта транспортной инфраструктуры к тому или иному классу: мост, тоннель и т. д. Кроме того, сооружения значительно отличаются по статистическим схемам, материалу конструкций и другим параметрам. Приведем некие типовые схемы расположения оборудования (рис. 7–12).



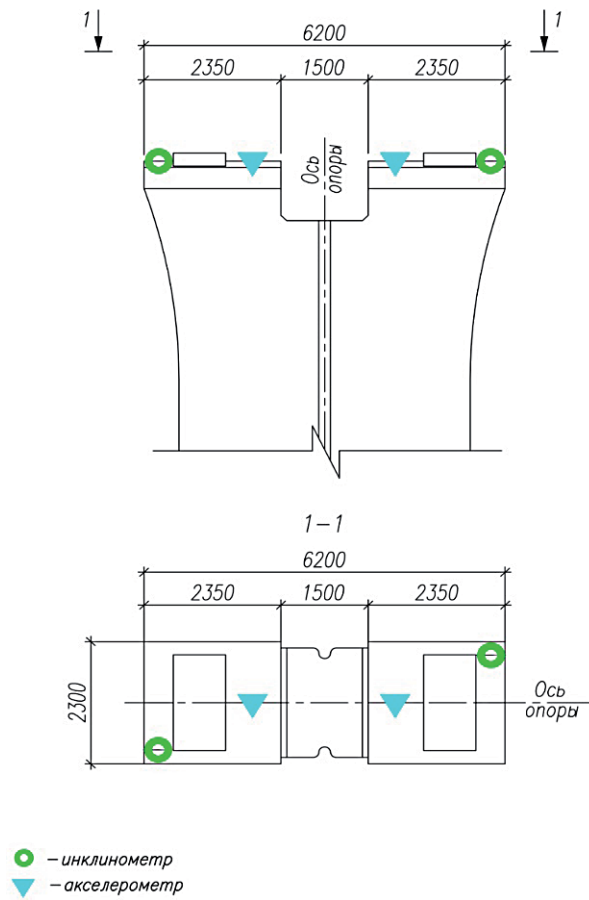


Рис. 7. Расстановка датчиков на опорах

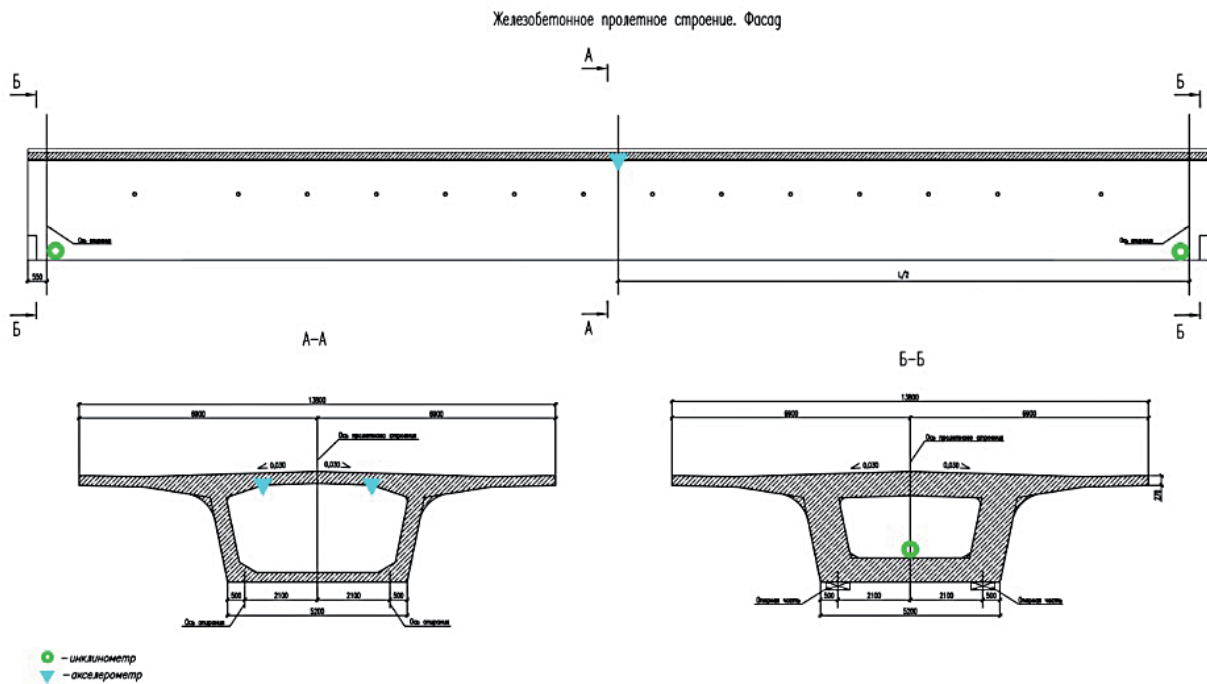


Рис. 8. Расстановка датчиков на железобетонном пролетном строении

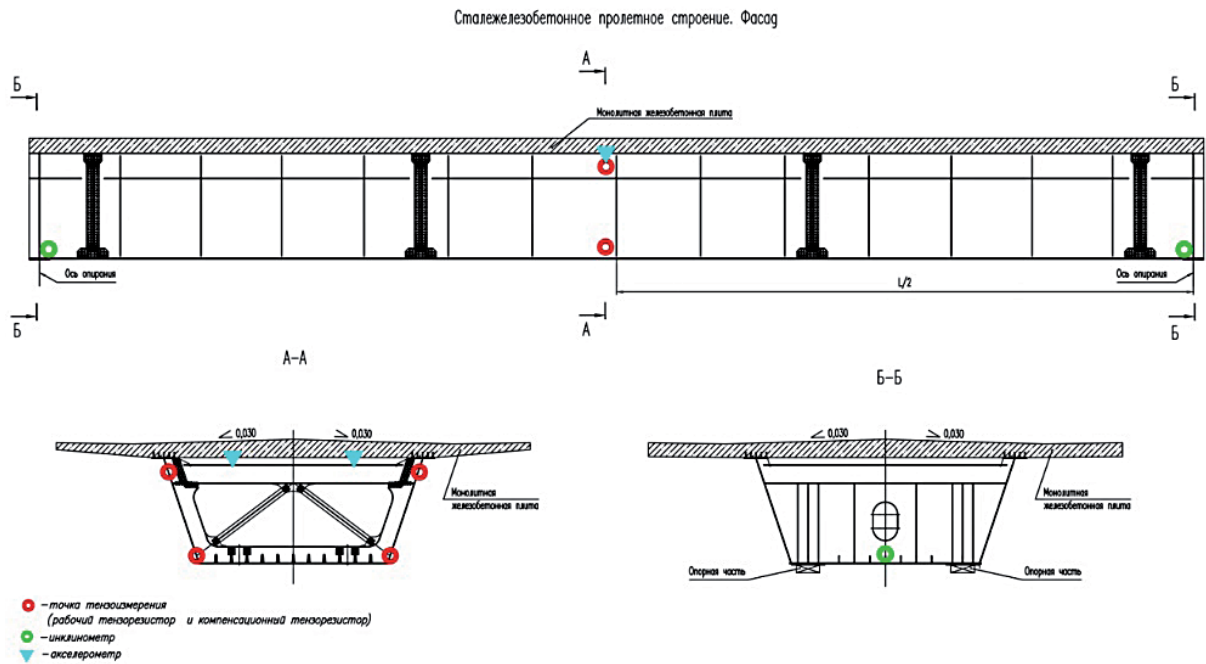


Рис. 9. Расстановка датчиков на сталежелезобетонном пролетном строении

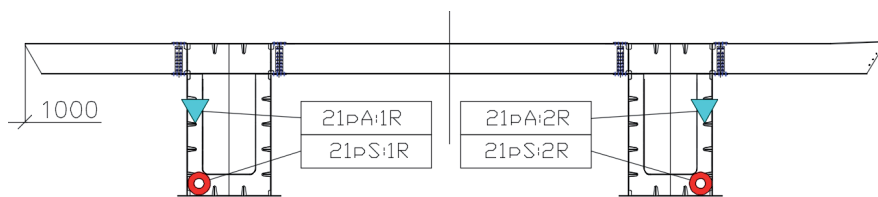


Рис. 10. Расстановка датчиков на металлическом пролетном строении

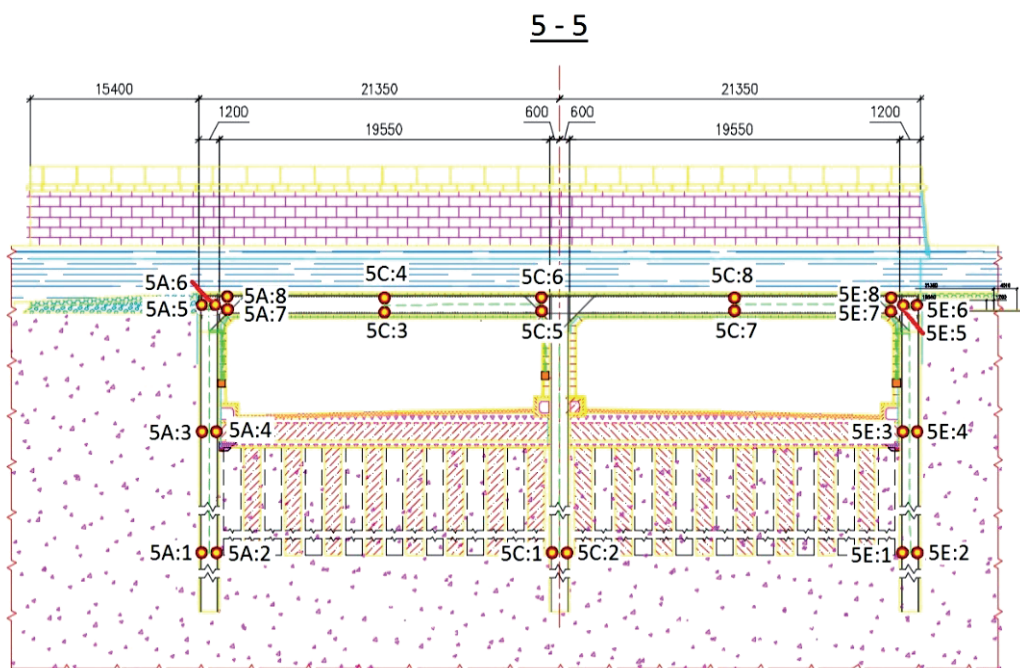


Рис. 11. Расстановка датчиков на опорах и стенах тоннеля

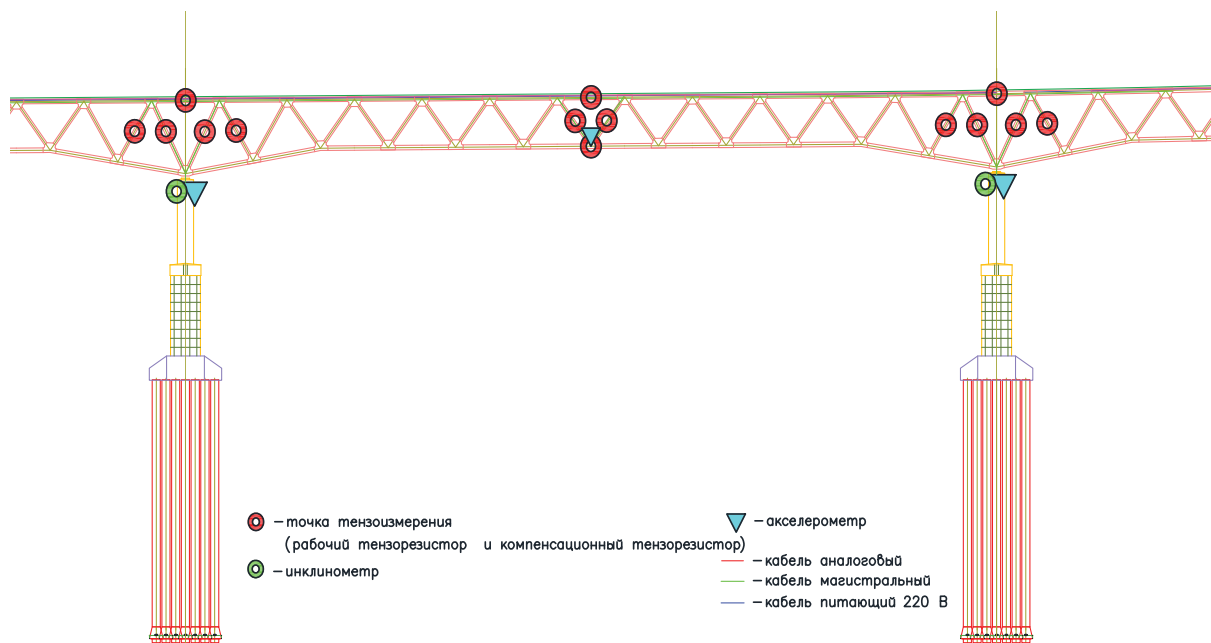


Рис. 12. Расстановка датчиков на решетчатом пролетном строении

## Заключение

Освещаются основные положения выполненной авторами статьи разработки концепции мониторинга искусственных дорожных сооружений Санкт-Петербурга с применением автоматизированных технологий с последующей разработкой на ее основе рабочей документации на систему автоматизированного мониторинга моста Александра Невского.

Системы мониторинга все более широкое используют во всех сферах жизнедеятельности человека, в процессах автоматизации управления состоянием объектов транспортной инфраструктуры, таких как мостовые и тоннельные сооружения.

До настоящего времени в нашей стране отмечались единичные случаи использования средств инструментального мониторинга; авторами статьи впервые предложена полноценная концепция, охватывающая все городские дорожные объекты.

Инструментальный мониторинг технического состояния конструкций — актуальный инструмент, направленный на повышение эффективности содержания искусственных дорожных сооружений, его основу составляют физические законы и алгоритмы автоматизации.

Авторами статьи в процессе подготовки концепции мониторинга осуществлен анализ объектов с выработкой четких критериев для оборудования их средствами мониторинга, сформированы четыре группы объектов. В противном случае могла возникнуть ситуация избыточности мониторинга и последующее снижение эффективности функционирования системы.

Первоочередные для реализации концепции мониторинга – крупные объекты транспортной инфраструктуры, такие как транспортные тоннели и разводные мосты. Пионером должен являться мост Александра Невского, техническое состояние которого требует пристального внимания.

По основным объектам города предложены типовые схемы оснащения средствами мониторинга, хотя для внеклассных объектов в каждом конкретном случае требуется разработка индивидуальной документации.

## Библиографический список

1. Самитов Р. А. Системотехника организации инженерного мониторинга сложных строительных сооружений (на примере автодорожных мостов) : дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2001. – 299 с.
2. Титова Т. С. Мониторинг и обеспечение техносферной безопасности природных и антропогенных систем / Т. С. Титова, Р. Г. Ахтямов, А. Н. Елизарьев, Е. Н. Елизарьева. – Уфа : ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2017. – 113 с.
3. Карапетов Э. С. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы / Э. С. Карапетов, А. А. Белый // Вестник «Зодчий. 21 век». – 2008. – № 4. – С. 80–83.
4. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
5. Sumitro S. Structural Health Monitoring System Applications in Japan / S. Sumitro, M. L. Wang // In : Ansari F. (eds). Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, Dordrecht, 2005. – Pp. 495–504.
6. Andersen J. E. Structural health monitoring systems / J. E. Andersen, M. Fustinoni. – Italy : L&S S.r.l. Servizi Grafici, 2006. – 126 p.
7. Rucker W. Guideline for structural health monitoring. Final report. SAMCO / W. Rucker, F. Hille, R. Rohrman. – Berlin, 2006. – 63 p.
8. Lienhart W. State of the art of geodetic bridge monitoring / W. Lienhart, M. Ehrhart // Structural Health Monitoring 2015 : System Reliability for Verification and Implementation. – Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM, 2015.
9. Furkan M. An investigation on wireless sensors for asset management and health monitoring of civil structures / M. Furkan, Q. Mao, M. Mazzetti, J. De Vitis, S. P. Sumitro, Fr. Faridazar, A. E. Aktan, F. Moon, I. Bartoli // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2016. Proc. of SPIE, vol. 9803.
10. Kaloop M. R. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique / M. R. Kaloop, J. Wan Hu // Journal of Sensors. – 2016. – Vol. 2016. – 14 p.

11. 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). – Pp. 1–10.
12. Thomas G. R. Durability of structural health monitoring systems under impact loading / G. R. Thomas, A. A. Khatibi // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 188. – Pp. 340–347.
13. Wenzel H. Health monitoring of bridges / H. Wenzel. – Chichester : John Wiley & Sons, 2009. – 621 p.
14. Яшнов А. Н. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске / А. Н. Яшнов, Т. М. Баранов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2017. – № 1. – С. 199–209.
15. 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.
16. 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.
17. Брынь М. Я. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий / М. Я. Брынь, Е. Г. Толстов, А. А. Никитчин, Б. Резник, А. И. Яценко, О. В. Евстафьев, В. А. Кучумов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2009. – Вып. 2 (19). – С. 120–128.
18. Нигаматова О. И. Мониторинг транспортных сооружений / О. И. Нигаматова, И. Г. Овчинников // *Инновационный транспорт*. – 2015. – № 1 (15). – С. 30–34.
19. Сырков А. В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений / А. В. Сырков // *Автоматизация в промышленности*. – 2014. – № 2. – С. 34–38.
20. Efanov D. Permanent Monitoring of Railway Overhead Catenary Poles Inclination / D. Efanov, D. Sedykh, G. Osadchy, D. Barch // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 163–167.
21. Быкова Н. М. Система автоматизированного мониторинга геодинамической безопасности городских мостов / Н. М. Быкова, Д. А. Зайнагабдинов, Т. М. Баранов, В. О. Мишутин // *Транспортное строительство*. – 2011. – № 7. – С. 10–13.
22. Сырков А. В. Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга / А. В. Сырков, О. В. Крутиков // *Автоматизация в промышленности*. – 2012. – № 9. – С. 45–50.
23. Белый А. А. Система мониторинга инженерных конструкций мостового перехода через реку Кубань в Краснодаре / А. А. Белый, К. Ю. Долинский // *Дорожная держава*. – 2013. – № 50. – С. 38–39.
24. Белый А. А. Система мониторинга инженерных конструкций при строительстве тоннеля под рекой Смоленка (г. Санкт-Петербург) / А. А. Белый, К. Ю. Долинский, Г. В. Осадчий // *Геотехника*. – 2016. – № 2. – С. 18–27.



25. Богданов Г. И. Петербургские мосты : монография / Г. И. Богданов. – СПб. : Белое и черное, 2006. – 183 с.
26. Петров Д. Ю. СПб ГУП «Мостотрест» : 80 лет безупречной работы / Д. Ю. Петров, А. А. Белый // Дороги. Инновации в строительстве. – 2012. – № 19. – С. 34–36.
27. Рузов А. М. Эксплуатация мостового парка / А. М. Рузов. – М. : Академия, 2007. – 176 с.
28. Карапетов Э. С. Содержание и реконструкция городских транспортных сооружений : учеб. пособие / Э. С. Карапетов, В. Н. Мячин, Ю. С. Фролов. – М. : ФГБОУ «УМЦ ЖДТ», 2013. – 300 с.
29. Карапетов Э. С. Проблема долговечности железобетонных мостов / Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. тр. Международной научно-технической конференции 2015 г. – [СПб.], 2015. – С. 111–116.
30. Белый А. А. Основные положения методики прогнозирования сроков службы эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений / А. А. Белый // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 10 (64). – С. 9–20.
31. Каптелин С. Ю. Современные приборы для обследования и испытания мостов / С. Ю. Каптелин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 20–27.
32. Сырков А. В. Оценка и управление состоянием мостовых сооружений с помощью анализа рисков / А. В. Сырков // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 4. – С. 38–40.
33. Sýkora M. Verification of existing reinforced concrete bridges using the semi-probabilistic approach / M. Sýkora, M. Holický, J. Marková // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – Pp. 1419–1426.
34. Прибытков С. С. Проблема выбора методики анализа рисков, связанных с неисправностями железобетонных пролетных строений мостов / С. С. Прибытков, А. В. Александров // Вестник СибГУПС. – 2014. – № 30. – С. 16–21.
35. Сапожников Вал. В. Оптимальный систематический код на основе взвешивания разрядов информационных векторов и суммирования без переносов для систем функционального контроля / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев, Ц. Хуан // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 75–84.
36. Ефанов Д. В. Особенности автоматизации проектирования аппаратных средств для непрерывного мониторинга аналоговых сигналов в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов, Д. В. Седых, М. А. Гордон // Транспорт Урала. – 2017. – № 3 (54). – С. 14–23.



*Andrei A. Belyi,*  
«Bridges» department  
Emperor Alexander I Petersburg state transport university

*Alexander A. Belov,*  
JSC SIE «Promtransavtomatika»

*German V. Osadchy,*  
*Oleg V. Osetinskiy*  
LLC STC «Integrated Monitoring Systems»

*Kirill Yu. Dolinskiy*  
CJSC STC «Monitoring of bridges»

**Automation of technical condition management process  
of St. Petersburg artificial constructions with the usage  
of structural health monitoring tools**

The article describes developed by author collective Concept of monitoring of artificial road constructions of St. Petersburg with use of the automated technologies with the subsequent development on its basis of working documentation on the system of the automated monitoring of Alexander Nevsky Bridge. This Concept has been prepared based on the comprehensive and systematic analysis of city transport infrastructure objects. The research of emergence and functioning of automation systems on St. Petersburg constructions is executed as well as their evolutionary development and transformation to the single systems of structural health monitoring. For the first time use of monitors for the park of artificial constructions is proved. On the basis of detailed inspection of city objects (in total more than 700 units) criteria have been formulated and groups of transport objects which have allowed to allocate about 100 constructions are created, without fail due to be equipped with monitors. The basis for operability of structural health monitoring systems are physical laws and automation algorithms. The main used subsystems, such as stressed-deformed condition control, vibration diagnostics, control of rotation angles and elements inclinations, are given in the text of article with the description of measurements essence. Standard schemes of constructions and their elements with the monitors located on them are also provided.

structural health monitoring; transport infrastructure object; management of technical condition; automation processes; stressed-deformed condition

**References**

1. Samitov R. A. (2001). System engineering of organization of engineering monitoring of complex building structures (for example, road bridges) [Sistemotekhnika organizacii inzhenernogo monitoringa slozhnyh stroitel'nyh sooruzhenij (na primere avtodorozhnyh mostov)]. Diss. uch. st. d. t. n. Moscow. – 299 p.

2. Titova T. S., Ahtjamov R. G., Elizar'ev A. N., Elizar'eva E. N. (2017). Monitoring i obespechenie tehnosfernoj bezopasnosti prirodnyh i antropogennyh sistem [Monitoring i obespechenie tehnosfernoj bezopasnosti prirodnyh i antropogennyh sistem]. Ufa, GOU VPO «Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet». – 113 p.
3. Karapetov Je. S., Belyj A. A. (2008). Monitoring of bridge structures in St. Petersburg. History. Appointment. Examples. Prospects [Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy]. Vestnik «Zodchij. 21 vek», vol. 4. – Pp. 80–83.
4. Efanov D. V. (2016). Concurrent Checking and Monitoring of Railway Automation and Remote Control Devices [Funkcional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorožnoj avtomatiki i telemehaniki: monografija]. – St. Petersburg, FGBOU VO PGUPS. – 171 p.
5. Sumitro S., Wang M. L. (2005). Structural Health Monitoring System Applications in Japan. In: Ansari F. (eds). Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, Dordrecht. – Pp. 495–504.
6. Andersen J. E. (2006). Fustinoni M. Structural health monitoring systems. Italy, L&S S. r. l. Servizi Grafici. – 126 p.
7. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. (2006). Guideline for structural health monitoring. Final report. SAMCO, Berlin. – 63 p.
8. Lienhart W., Ehrhart M. (2015). 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.
9. Furkan M., Mao Q., Mazzetti M., DeVitis J., Sumitro S. P., Faridazar Fr., Aktan A. E., Moon F., Bartoli I. (2016). 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, Proc. of SPIE, vol. 9803.
10. Kaloop M. R., Wan Hu J. (2016). Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique. Journal of Sensors, vol. 2016. – 14 p.
11. Yang Y., Li Q. S., Yan B. W. (2017). Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. Advances in Mechanical Engineering, vol. 9(1). – Pp. 1–10.
12. Thomas G. R., Khatibi A. A. (2017). Durability of structural health monitoring systems under impact loading. Procedia Engineering, vol. 188. – Pp. 340–347.
13. Wenzel H. (2009). Health monitoring of bridges. Chichester, John Wiley & Sons. – 621 p.
14. Jashnov A. N., Baranov T. M. (2017). Monitoring of dynamic behavior of bridge across the angara in irkutsk [Nekotorye rezul'taty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez r. Angaru v Irkutske]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta], vol. 1. – Pp. 199–209.
15. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. S. (2017). Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint Petersburg example). Procedia Engineering, vol. 189. – Pp. 145–151.

16. Hiller B., Jambaev H. K. (2016). Investigation of automated system of deformation monitoring of lock chambers [Issledovanie avtomatizirovannoj sistemy deformatsionnogo monitoringa shljuzovyh kamer]. News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography [Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geodezija i ajerofotos#emka], vol. 3. – Pp. 33–38.
17. Bryn' M. Ja., Tolstov E. G., Nikitchin A. A., Reznik B., Jashhenko A. I., Evstaf'ev O. V., Kuchumov V. A. Investigation of automated system of deformation monitoring of lock chambers [Geodezicheskij monitoring deformatsij vantovyh mostov na osnove sputnikovyh tehnologij]. Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestija Peterburgskogo Universiteta Putej Soobshhenija], vol. 2(19). – Pp. 120–128.
18. Nigmatova O. I., Ovchinnikov I. G. (2015). Monitoring of transport facilities [Monitoring transportnyh sooruzhenij]. Innotrans [Innovacionnyj transport], vol. 1 (15). – Pp. 30–34.
19. Syrkov A. V. (2014). Ways of development of automated systems of operation and maintenance of road artificial structures [Puti razvitija avtomatizirovannyh sistem jekspluatacii i sodержanija avtodorozhnyh iskusstvennyh sooruzhenij]. Automation in the industry [Avtomatizacija v promyshlennosti], vol. 2. – Pp. 34–38.
20. Efanov D., Sedykh D., Osadchy G., Barch D. (2017). 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.
21. Bykova N. M., Zajnagabdinov D. A., Baranov T. M., Mishutin V. O. (2011). The system of computeraided monitoring of geodynamic safety of urban bridges [Sistema avtomatizirovannogo monitoringa geodinamicheskoj bezopasnosti gorodskih mostov] // Transport construction [Transportnoe stroitel'stvo], vol. 7. – Pp. 10–13.
22. Syrkov A. V., Krutikov O. V. (2012). Optimization of the life cycle of the bridge to the Russky Island in Vladivostok through risk analysis and monitoring [Optimizacija zhiznennogo cikla mosta na ostrov Russkij vo Vladivostoke sredstvami analiza riskov i monitoring]. Automation in the industry [Avtomatizacija v promyshlennosti], vol. 9. – Pp. 45–50.
23. Belyj A. A., Dolinskij K. Ju. (2013). System for monitoring engineering structures of a bridge across the Kuban River in Krasnodar [Sistema monitoringa inzhenernyh konstrukcij mostovogo perehoda cherez reku Kuban' v Krasnodare]. Road Power [Dorozhnaja derzhava], vol. 50. – Pp. 38–39.
24. Belyj A. A., Dolinskij K. Ju., Osadchij G. V. (2016). System for monitoring engineering structures in the construction of a tunnel under the Smolenka River (St. Petersburg) [Sistema monitoringa inzhenernyh konstrukcij pri stroitel'stve tonnelja pod rekoj Smolenka (g. Sankt-Peterburg)]. Geotechnics [Geotehnika], vol. 2. – Pp. 18–27.
25. Bogdanov G. I. (2006). Petersburg Bridges [Peterburgskie mosty: monografija]. St. Petersburg, Izd. «Beloe i chernoe». – 183 p.
26. Petrov D. Ju., Belyj A. A. (2012). SPb State Unitary Enterprise “Mostotrest”: 80 years of impeccable work [SPb GUP «Mostotrest»: 80 let bezuprechnoj raboty]. Roads. Innovations in construction [Dorogi. Innovacii v stroitel'stve], vol. 19/2012. – Pp. 34–36.

27. Ruzov A. M. (2007). Operation of bridges [Jekspluatacija mostovogo parka]. Moscow, Akademija. – 176 p.
28. Karapetov Je. S., Mjachin V. N., Frolov Ju. S. (2013). Maintenance and reconstruction of urban transport facilities [Soderzhanie i rekonstrukcija gorodskih transportnyh sooruzhenij: ucheb. Posobie]. Moscow, FGBOU «UMC ZhDT». – 300 p.
29. Karapetov Je. S., Shestovickij D. A. (2015). The problem of the durability of reinforced concrete bridges [Problema dolgovechnosti zhelezobetonnyh mostov]. New technologies in bridge building (from the past to the future). Collection of Proceedings of the International Scientific and Technical Conference 2015 [Novye tehnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushhemu). Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii 2015 goda]. – Pp. 111–116.
30. Belyj A. A. (2016). Main Provisions of the Forecasting Method of the Service Life of Reinforced Concrete Bridges [Osnovnye polozhenija metodiki prognozirovaniya srokov sluzhby ekspluatiruemykh zhelezobetonnyh mostovyh sooruzhenij]. Science and business: development ways [Nauka i biznes: puti razvitija], vol. 10 (64). – Pp. 9–20.
31. Kaptelin S. Ju. (2014). The measuring equipment for dynamic tests of transport constructions [Sovremennye pribory dlja obsledovanija i ispytaniya mostov]. Railway Track and Facilities [Put' i putevoe hozjajstvo], vol. 7. – Pp. 20–27.
32. Syrkov A. V. (2009). Development of methods for estimation and management of bridge conditions by means of the analysis of risks [Ocenka i upravlenie sostojaniem mostovyh sooruzhenij s pomoshh'ju analiza riskov]. Science and Engineering for Highways [Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli], vol. 4. – Pp. 38–40.
33. Sýkora M., Holický M., Marková J. (2013). Verification of existing reinforced concrete bridges using the semiprobabilistic approach. Engineering Structures, vol. 56. – Pp. 1419–1426.
34. Pribytkov S. S., Aleksandrov A. V. (2014). The problem of choosing a methodology for analyzing the risks associated with faults in reinforced concrete bridge spans [Problema vybora metodiki analiza riskov, svjazannyh s neispravnostjami zhelezobetonnyh proletnyh stroenij mostov]. Vestnik of Siberian transport university [Vestn. SibGUPS], vol. 30. – Pp. 16–21.
35. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V., Huan C. (2016). The optimal systematic code based on the weighting of bits of information vectors and summation without hyphenation for concurrent error detection systems [Optimal'nyj sistematcheskij kod na osnove vzveshivaniya razrjadov informacionnyh vektorov i summirovaniya bez perenosov dlja sistem funkcional'nogo kontrolja]. Izvestia of St. Petersburg University of means of communication [Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija], vol. 1. – Pp. 75–84.
36. Efanov D. V., Sedyh D. V., Gordon M. A. (2017). Features of design automation of hardware for analog signals health monitoring in railway signaling devices [Osobennosti avtomatizacii proektirovaniya apparatnyh sredstv dlja nepreryvnogo monitoringa analogovyh signalov v ustrojstvah zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki]. Transport of the Urals [Transport Urala], vol. 3 (54). – Pp. 14–23.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 19.03.2018, принята к публикации 13.04.2018*

*БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.  
e-mail: andbeliy@mail.ru

*БЕЛОВ Александр Алексеевич* – заместитель генерального директора АО НПП «Промтрансавтоматика», Санкт-Петербург.  
e-mail: alexandrbelov21@yandex.ru

*ОСАДЧИЙ Герман Владимирович* – технический директор ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга».  
e-mail: osgerman@mail.ru

*ОСЕТИНСКИЙ Олег Владимирович* – руководитель проектной группы ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург.  
e-mail: oleg\_man13@mail.ru

*ДОЛИНСКИЙ Кирилл Юрьевич* – заместитель генерального директора ЗАО «НТЦ “Мониторинг мостов”», Санкт-Петербург.  
e-mail: kdmonitoring@mail.ru

© Белый А. А., Белов А. А., Осадчий Г. В., 2018  
© Осетинский О. В., Долинский К. Ю., 2018