

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst701828>

© А.А. Белый^{1,2}, Е.И. Павлов³

¹ Ташкентский Государственный транспортный университет
(Ташкент, Узбекистан)

² ООО «К2 Инжиниринг»

³ ООО «НПЦ «БАУ-Мониторинг»
(Москва, Россия)

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ И ГРАЖДАНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Цель. Анализ причин снижения надежности и практические предложения по устранению их влияния для систем мониторинга инженерных конструкций объектов транспортной и гражданской инфраструктуры.

Материалы и методы. Для получения результатов используются статистические данные с баз данных действующей системы мониторинга инженерных конструкций. Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения теоретических методов научного познания: аналитический метод, теория математической статистики, индукция.

Результаты. Представлен анализ причин снижения надежности действующих систем мониторинга. Предложены решения по снижению влияния метрологических поверок на надежность систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) и ложных срабатываний средств измерений на надежность СМИК.

Заключение. Полученные результаты исследования можно использовать при нормировании СМИК (разработке новых стандартов и нормативов), проектировании и устройстве систем мониторинга инженерных конструкций на объектах транспортной и гражданской инфраструктуры, а также при модернизации уже действующих систем мониторинга для улучшения качества оценки технического состояния конструкций.

Ключевые слова: система мониторинга инженерных конструкций; управление техническим состоянием; объект транспортной инфраструктуры; надежность; напряженно-деформированное состояние.

Как цитировать:

Белый А.А., Павлов Е.И. Надежность систем мониторинга объектов транспортной и гражданской инфраструктуры // Инновационные транспортные системы и технологии. 2026. Т. 12, № 1. С. 76–95. doi: 10.17816/transsyst701828

Heading 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL STUDIES

Topic: Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transport tunnels

© A.A. Belyi^{1,2}, E.I. Pavlov³

¹ Tashkent State Transport University
(Tashkent, Uzbekistan)

² K2 Engineering, LLC

³ BAU-Monitoring Research and Development Center LLC
(Moscow, Russia)

RELIABILITY OF TRANSPORT AND CIVIL INFRASTRUCTURE MONITORING SYSTEMS

AIM: This study aimed to analyze the causes of reduced reliability and propose practical solutions to eliminate their effect on monitoring systems for engineering structures of transport and civil infrastructure.

METHODS: The study uses statistics from the databases of the existing engineering structure monitoring system and theoretical methods of scientific knowledge (analytical method, mathematical statistics theory, and inductive reasoning).

RESULTS: The paper presents an analysis of the causes of reduced reliability of existing monitoring systems and proposes solutions to mitigate the effect of calibration tests on the reliability of engineering structure monitoring systems (ESMS) and the effect of misoperation of instruments on the reliability of ESMS.

CONCLUSION: The findings may be used in the standardization of ESMS (development of new standards and regulations); design and installation of engineering structure monitoring systems for transport and civil infrastructure, and the improvement of existing monitoring systems to improve the health assessment quality of the structures.

Keywords: engineering structure monitoring system; health management; transport infrastructure; reliability; stress-strain state.

To cite this article:

Belyi AA, Pavlov EI. Reliability of Transport and Civil Infrastructure Monitoring Systems. *Modern Transport Systems and Technologies*. 2026;12(1):76–95. doi: 10.17816/transsyst701828

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной инженерной практики внедрение и применение систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК)¹ рассматривается как обязательный и неотъемлемый элемент жизненного цикла внеклассных мостовых сооружений, обеспечивающий их надежную и безопасную эксплуатацию. Использование таких систем позволяет осуществлять непрерывный контроль за состоянием конструкций на протяжении всего срока службы сооружения с учетом изменяющихся эксплуатационных и природно-климатических воздействий [1–5].

Применение СМИК регламентируется действующей нормативно-технической базой и направлено на обеспечение требуемого уровня эксплуатационной и конструктивной безопасности мостовых сооружений. Функционирование данных систем способствует снижению вероятности возникновения аварийных и предаварийных ситуаций, а также минимизации рисков, связанных с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, транспортной инфраструктуре, имуществу и окружающей среде в целом.

СМИК представляет собой совокупность технических и программных средств, обеспечивающих информационное сопровождение процессов принятия управленческих и эксплуатационных решений. Данный технический инструмент позволяет осуществлять сбор, обработку и анализ данных о параметрах технического состояния мостового сооружения на всех стадиях его жизненного цикла – от ввода в эксплуатацию до капитального ремонта или реконструкции. Реализация мониторинга осуществляется путем систематического или периодического наблюдения за состоянием конструктивных элементов, выявления отклонений от нормативных показателей и своевременного принятия мер по предупреждению развития дефектов и повреждений [1–5].

Следует отметить, что СМИК относятся к сложным техническим системам, функционирование которых осуществляется в условиях воздействия множества внешних и внутренних факторов. Эксплуатационные нагрузки, агрессивные природно-климатические условия, электромагнитные помехи, а также процессы физического и морального износа элементов могут оказывать влияние на надежность

¹ СМИК – в аббревиатуре законодательства России; в других государствах приняты другие сокращения, например в Республике Казахстан АСМ – автоматизированные системы мониторинга; в англо-язычной терминологии – Structural Health Monitoring (SHM). Далее по тексту настоящей статьи будет использоваться именно аббревиатура СМИК

и точность работы систем мониторинга, что требует учета данных факторов при их проектировании, внедрении и эксплуатации. Кроме того, отдельным аспектом следует выделить обеспечение метрологической надежности систем мониторинга, включая необходимость регулярной поверки и контроля технического состояния применяемых датчиков и измерительных средств, что в теории является обязательным условием поддержания требуемой точности измерений и надежности функционирования системы в целом.

При этом стоит обратить внимание, что большинство публикаций и исследований на тему мониторинга посвящены либо его теоретическим основам [1–5], либо практическим реализациям на конкретных объектах [6–10], иногда с анализом результатов работы (имеется ввиду прежде всего анализ технического состояния конструкции). И лишь малая часть работ освещает проблему надежности подобных систем в целом, или какие-то ее (надежности) частные показатели – работоспособность, долговечность и так далее [11–13]. Кроме того, известны некоторые публикации по оценке эффективности (технической, экономической) систем мониторинга [14–17].

Анализ работ в смежных сферах показал, что состояние вопроса весьма актуально в военном деле [18, 19], метрологическом



Рис. 1. Авторы статьи (справа – Белый А.А., посередине – Павлов Е.И.) при монтаже датчиков СМИК на одном из строящихся объектов

Fig. 1. Authors (A.A. Belyi (right), E.I. Pavlov (center)) during the installation of ESMS sensors at a construction site

обеспечении [20], атомной энергетике [21], тепловой энергетике [22], электроснабжении [23–25] и иных производственных процессах [26–28].

В настоящей статье целью исследования заявлена проблема снижения (и соответственно пути ее решения) надежности систем мониторинга объектов транспортной и гражданской инфраструктуры, в том числе из-за проведения поверочных мероприятий средств измерения.

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Определенный опыт авторов настоящей статьи в сфере проектирования, монтажа, пуско-наладки и обслуживания СМИК позволяет с уверенностью отметить следующее. Сложившаяся практика такова, что у существующих и вводимых в строй систем мониторинга низкая надежность, что в результате не повышает, а снижает надежность всего сооружения. И таких случаев мы имеем до 90%. Основных причин низкой надежности две (и третья, как отчасти следствие второй).

Первая причина заключается в том, что проектирование, установка и обслуживание СМИК осуществляется по остаточному принципу при ограниченном количестве специалистов в этой области. Данный вопрос носит не технический характер, и поэтому не рассматривается нами как предмет научного исследования.

Вторая причина кроется в строгом соблюдении законодательной и нормативной базы, несовершенство которой является препятствием для повышения надежности СМИК.

Разберем эту проблему подробнее. В качестве примера возьмем СМИК на мосту. Поскольку не существует датчика, который измеряет несущую способность моста и который периодически можно сдавать в поверку, для мониторинга состояния моста создается СМИК, которая является сложной системой. В такой системе датчики измеряют параметр, который для каждого датчика рассчитывается по специальной методике расчета для определения интегральных характеристик моста. А уже интегральные характеристики связаны с изменением его состояния. Здесь важно подчеркнуть, что интегральные характеристики получаются в результате не прямых, а косвенных измерений и расчетов. Как пример – использование закона Гука при анализе напряжений в конструкциях, полученных при регистрации деформаций на определенном плече.

Мост или здание обычно находится на балансе государственных эксплуатирующих организаций, а поэтому попадает в сферу государственного регулирования. В силу чего все датчики, установленные

на объекте, должны быть внесены в Реестр средств измерений. Однако указанное обстоятельство еще не весь спектр проблем. Помимо этого, средства мониторинга необходимо регулярно поверять, обычно через год. Для этого их нужно демонтировать, транспортировать в аккредитованную лабораторию, дождаться результатов поверки, затем транспортировать обратно и монтировать на объект. Как правило, подобные датчики изготовлены для стационарной работы, а не переносной, и не рассчитаны на частый монтаж-демонтаж.

Тем не менее надзорные органы просто обязаны требовать поверку датчиков в соответствии с Федеральным Законом о единстве средств измерений², а эксплуатирующая организация не в состоянии это делать, поскольку финансовые затраты на СМИК могут достигать уровня текущих затрат на эксплуатацию объекта, но они никогда не учитываются.

В качестве дополнительных рисков у нас есть пример, когда в 2025 году сгорела фура транспортной компании, перевозившая оборудование (датчики), предназначенные для мониторинга и испытаний.

Поэтому подобная процедура гарантированно, на некоторое время, оставляет объект без системы мониторинга, т.к. согласовать подменный комплект датчиков еще никому в истории России не удалось. Отметим,



Рис. 2. Сгоревшая фура транспортной компании, перевозившая датчики СМИК
Fig. 2. A burned truck owned by a transport company that was carrying ESMS sensors

² Федеральный закон от 26.06.2008 №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»

что в некоторых случаях в составе СМИК присутствуют, так называемые ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности), но их 5% от общего количества. Они предназначены для других целей, и их тоже нужно проверять.

Надежность системы СМИК в результате такой процедуры (демонтаж-транспортировка-проверка-транспортировка-монтаж) раз за разом снижается.

К счастью, существуют методы повышения надежности систем мониторинга, в которых не предусмотрена периодическая проверка датчиков. Комбинация этих методов позволяет значительно улучшить надежность СМИК, но для этого нужно обозначить проблему на уровне Госстандарта. Это серьезная научная работа, но она способна закрыть значительное направление в отрасли, связанное с безопасностью сооружений повышенного уровня ответственности.

Есть и еще одна составляющая надежности СМИК, являющаяся по сути следствием предыдущего фактора. Так называемые – ложные срабатывания датчиков. Эти ложные срабатывания в целом подчиняются классическим законам статистики (в том плане, что к ним нужно относиться как к «выбросам» в результатах измерения и устранять из анализа [7]). Оценке работоспособности одного типа датчиков посвящены исследования [12, 13], что является существенным прогрессом в данной сфере. Автор показал, как можно фактически неработоспособную систему мониторинга сделать работоспособной с помощью статистических методов обработки данных.

Это не единственный метод повышения надежности СМИК. Нами, в качестве примеров далее предлагаются алгоритмы защиты от ложных срабатываний, что, в частности, совпадает с изложенным ранее тезисом о том, что любая СМИК – это интегральная система, которую рекомендуется строить из нескольких подсистем на разных физических принципах (классически: тензометры, инклинометры, акселерометры), тогда интегральные характеристики этих подсистем будут жестко связаны друг с другом.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО СНИЖЕНИЮ ВЛИЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРОК НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

В качестве первого примера опишем акселерометр-инклинометр АЦт90. Данный прибор внесен в государственный реестр средств

измерений в 2018 г. под номером 73369-18. За прошедший период приборы проходили первичную и периодическую поверки, в результате которых не было зарегистрировано случаев непрохождения.

Изначально прибор проектировался для долговременного мониторинга, имеет запас по точности измерений и поэтому он легко проходит периодические поверки. При этом в данном приборе реализована методика калибровки «на месте». В частности, тогда, когда на мосту измеряются вертикальные вибрации.

Прибор рассчитан на измерение силы тяжести (с учетом ускорения свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$), т.е., он предназначен для измерения не только переменного, но и постоянного ускорения. Он имеет плоскую частотную характеристику от 0 до 20 Гц. Чтобы убедиться в работоспособности прибора, достаточно контролировать силу тяжести. Если прибор измеряет ее с погрешностью 1 %, то он исправен и поддерживает заявленную точность измерений.

В соответствии с характером своей работы, прибор постоянно по запросу каждую секунду передает данные измерений за предыдущую секунду. При анализе этих данных в автоматическом режиме и производится встроенная калибровка. Это обеспечивает непрерывные и более надежные измерения по сравнению с периодической процедурой демонтажа, транспортировки, поверки, обратной транспортировки и последующего монтажа на объект.



Рис. 3. Акселерометр-инклинометр АЦт90 (вверху).
Промышленный сервер-контроллер MS 4812 (внизу)

Fig. 3. Accelerometer/inclinometer Act90 (top).
Industrial controller server MS 4812 (bottom)

Второй пример связан с математической обработкой акселерограмм. И здесь следует перейти к понятию «когерентность»³ (особый тип связности, который характеризуется внутренней согласованностью, логической непротиворечивостью и целостностью системы). Вкратце, математическое описание предлагаемого решения с точки зрения когерентности возможно с использованием спектров Фурье. При работе с ними можно делать обработку нескольких спектров следующим образом. Определяется спектр реакции с минимизацией шума на выходе Y для системы с одним входом X :

$$S_j(y, x) = \frac{\sum_{i=1}^n Y(i)X^*(i)}{\sum_{i=1}^n X(i)X^*(i)} \quad (1)$$

где X – вход системы; Y – выход системы; X^* – величина, комплексно сопряженная с X ; j – номер исследуемой частоты в развертке; i – номер периода для каждой исследуемой частоты.

Естественно, число периодов нагружения должно быть больше единицы.

Дополнительно определяется еще одна функция, называемая функцией когерентности:

$$Coh_j(y, x) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n X(i)Y^*(i)\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n Y(i)X^*(i)\right)}{\left(\sum_{i=1}^n X(i)X^*(i)\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n Y(i)Y^*(i)\right)} \quad (2),$$

где X^* – величина, комплексно сопряженная с X ; Y^* – величина, комплексно сопряженная с Y ; j – номер исследуемой частоты в развертке; i – номер периода для каждой исследуемой частоты.

Функция когерентности принимает действительные значения от 0 до единицы. Если когерентность равна нулю, то выходной сигнал не зависит от входного и определяется другими источниками.

В простом случае, два датчика ускорения измеряют вибрации в центре пролета на крайних балках. Один датчик принимаем как вход, другой – как выход. Для датчиков считается передаточная функция, или спектр реакции с минимизацией шума на выходе и когерентность. Вблизи резонансных частот когерентность близка к единице. По когерентности

³ Когерентность бывает временная, оптическая (физическая), философская. В настоящей статье приведено общее определение когерентности, как совокупного явления, удовлетворяющего условиям научного предмета исследования.

также можно судить об исправности обоих датчиков. Важно отметить, если когерентность близка к нулю, то хотя бы один из двух датчиков неисправен, и показания обоих датчиков не учитываются.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ЛОЖНЫХ СРАБАТЫВАНИЙ ДАТЧИКОВ НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Как и любая технически сложная система, мониторинг в целом и в отдельных компонентах не застрахован от ложных, ошибочных срабатываний, вызванных целым рядом факторов. Задавшись некоторой стандартной (классической) структурой СМИК, состоящей из тензометрической подсистемы, инклинометрической подсистемы (системы контроля углов) и вибрационной подсистемы (с использованием датчиков-акселерометров), в общих чертах причины можно свести к следующим:

- наводки от смежных электрических систем (для всех подсистем);
- физические воздействия тяжеловесной, гусеничной и трамвайной нагрузки (для вибрационной подсистемы мониторинга – «зашкаливание» показателей акселерометров по причине возрастания вынужденных колебаний);
- электромагнитные воздействия и нагрузки с использованием электроэнергии (железнодорожной, метро, троллейбусной, трамвайной нагрузки) – эпизодические «просадки» показателей;
- скачки и отключения электропитания (для всех подсистем).

Кроме того, ряд объективных причин может приводить к частичным или полным, кратковременным или постоянным, ограничениям в функциональности работы средств мониторинга, а именно:

1) Наличие трещин, внутренних пустот или дефектов в материале (металле и бетоне) приводит к выводу из строя тензорезисторов.

2) Невозможность задания абсолютных начальных отметок для тензодатчиков и некоторых инклинометров, в связи с чем регистрируются прирост напряжений и углов наклона, а не абсолютные величины.

Таким образом, несмотря на огромную практическую пользу от смонтированных подсистем мониторинга, очевидно, что они (в целом и по отдельности) не являются своеобразной «панацеей», заменяющей регулярные осмотры и иные регламентные работы, осуществляемые специализированными службами. Цель мониторинга – регистрация опасных значений и информирование дежурных служб с последующим принятием решения ответственными работниками.

По совокупности вышеописанного нами предлагается следующая последовательность (алгоритм) действий при регистрации опасных сигналов в какой-либо из подсистем мониторинга.

При срабатывании датчиков, приводящим к «красным» значениям⁴, необходимо обязательное сопоставление с данными от иных подсистем. Объясняется это следующими примерами.

Фиксация чрезмерных частот колебаний или их отсутствие в датчиках–акселерометрах: при такой ситуации изменяется напряженно-деформированное состояние всего пролета/элемента (или даже всего объекта). Данные с тензорезисторов должны будут свидетельствовать об увеличении напряжений в элементах, углы наклона, регистрируемые инклинометрами, изменятся по причине дополнительных прогибов.

Обратная ситуация, когда «зашкаливают» инклинометры – прогибы балок/перекрытий, о которых они должны будут свидетельствовать, также приведут к перераспределению напряжений (регистрируются тензодатчиками), появлению чрезмерных деформаций, напряжений и изменений частотных характеристик (акселерометры).

Если обозначить каждую подсистему из вышеприведенной таблицы как n_i , то можно сформировать следующий алгоритм:

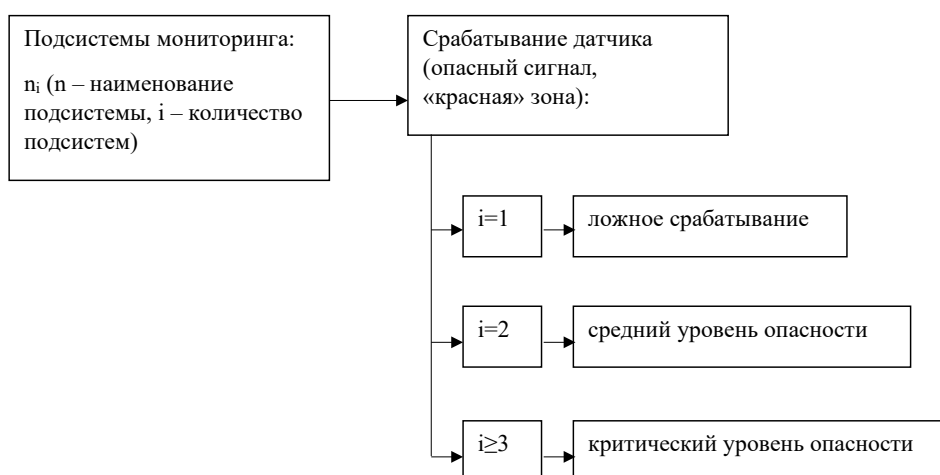


Рис. 4. Алгоритм 1 уровня

Fig. 4. Level 1 algorithm

⁴ Согласно общепринятой классификации, «зеленый сигнал» – работоспособное состояние, «оранжевый сигнал» – предупреждающий уровень опасности (70% от аварийного), «красный сигнал» – аварийное предупреждение. См. ГОСТ Р 22.3.13-2018 БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ. Руководство по цветовым кодам опасности (М: Стандартинформ, 2018) и «Методике мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Общие положения» (М., МЧС России, 2008)

При ложном срабатывании ($i=1$) нет необходимости принятия каких-либо действий, кроме плановых. Общий цвет мониторинга всего объекта – «зеленый».

При $i=2$ (средний уровень опасности) общий цвет объекта – «оранжевый», есть необходимость в срочной проверке в ручном формате (осмотр, обследование, освидетельствование) проблемной зоны, где сработали датчики мониторинга.

При $i \geq 3$ возникает критический уровень опасности, требующий срочной проверки в ручном формате (осмотр, обследование, освидетельствование) проблемной зоны, где сработали датчики мониторинга, введения ограничения движения. Общий цвет объекта – «красный».

Уже этот простой алгоритм позволит избежать ошибочных ситуаций, которые могут возникнуть при ложных срабатываниях датчиков.

Однако работа системы по алгоритму в данном виде будет весьма грубой и примитивной. Могут иметь место ситуации, когда срабатывают разные подсистемы в абсолютно не связанных между собой элементах объекта. Для компенсации этого недостатка и повышении точности на примере объекта, структурно разделенного на 5 макроэлементов, предлагается следующее.

Каждый из указанных «макроэлементов» системы технически можно разделить еще, получив большее число частей. Однако делать это нецелесообразно, т.к. для полноценной работы алгоритма необходимо, чтобы в элементе содержалось по крайней мере три подсистемы ($i \geq 3$).

Алгоритм сводится к виду:

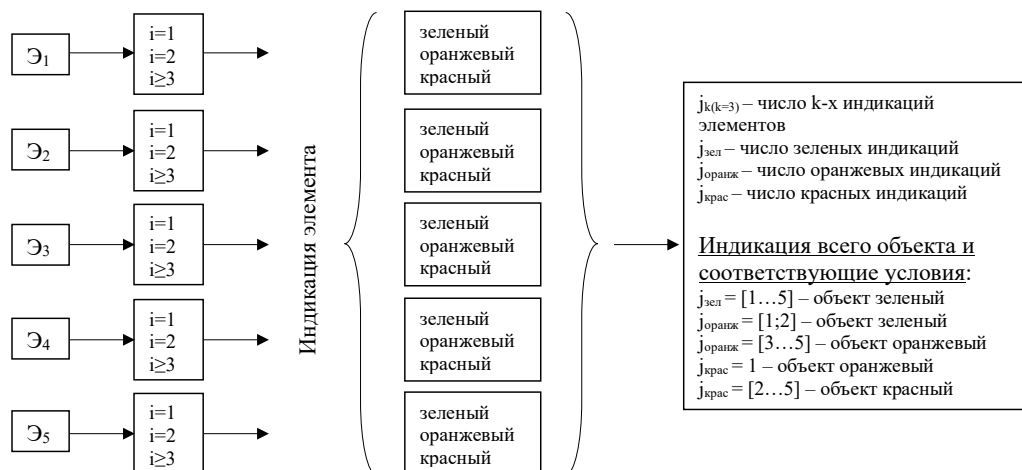


Рис. 5. Алгоритм 2 уровня (уточненный и расширенный)

Fig. 5. Level 2 algorithm (refined and extended)

Если будет принято решение о разбиении на большее число элементов (при соблюдении условия для элемента по числу подсистем мониторинга $i \geq 3$), то в схеме выше число «5» заменяется на число « m », где m – количество принятых элементов.

В практической плоскости данное предложение может быть трансформировано также в следующую комбинацию датчиков (как пример), по работоспособности каждого из которых можно судить о работоспособности всей СМИК и повышать ее надежность ее функционирования.

Например, представим себе, что необходимо контролировать напряженно-деформированное состояние объекта – напряжения в середине балки моста. Это достаточно распространенная практическая задача. Данная подсистема контроля деформаций предназначена для контроля напряжений, что является проблемой, если рассматривать ее как единственный способ контроля технического состояния объекта. Контроль напряжений в металле признан проблемой на уровне Госстандарта РФ. А вопрос о контроле напряжений в бетоне был поднят (на уровне Госстандарта РФ), но даже не обсуждался, т.е. полностью проблема контроля напряжений сегодня не решена. При испытаниях мостов напряжения контролируются через измерение деформаций. Испытания обычно проводятся в течение недели и показывают хорошие результаты. Однако при долговременных наблюдениях измерения могут неспровоцированно расходиться с реальностью. Тому есть множество причин. Первая среди них – пластичность металла. Обычно весь диапазон измеряемых деформаций не превышает 1500 ЕОД ($1\text{ЕОД} = 1 \cdot 10^{-6}$) или 0,15%. В то же самое время удлинение стандартного образца стали 10ХСНД составляет не менее 19%. В свою очередь, у бетона существует кратковременная, при твердении и долговременная, под нагрузкой, ползучесть, которая достигает величин 300 мкм/м.

Вследствие данных аспектов измерения деформаций нужно соотносить с другими видами измерений, например, с прогибами пролета. И рассматривать группу связанных измерений как отдельный узел, а не как показания независимых датчиков. В теоретическом плане это хорошее решение, а в практическом плане при непрерывном мониторинге нет простых и надежных методов измерений статического прогиба пролета.

Выход из ситуации предлагается следующий. Обычно форма и напряжения от статического прогиба пролета подобны форме

и напряжениям первой формы колебаний пролета. Измеряя одновременно динамические деформации и ускорения, можно решить настоящую задачу. Для измерения динамических деформаций лучше всего использовать тензорезисторы, для измерения колебаний – акселерометр. Таким образом мы формируем узел в среднем сечении пролета. Два тензорезистора располагаем на верхней плите коробчатой балки, два тензорезистора – на нижней. В данном случае воспользуемся практикой вместо одного наклеивать два тензорезистора: один основной, другой – резервный. Имеем 4 тензометрических канала, которые будут подключены, например, к устройству сбора данных УСД4. В том же сечении будет установлен акселерометр АЦт90, для измерения вибраций. Оба устройства, АЦт90 и УСД4 синхронизируют свои отсчеты от локального сервера и передают на него данные (до 256 отсчетов в секунду по каждому каналу). Из этих данных выделяется первая гармоника (от вертикальных колебаний, от деформации нижней плиты, от деформации верхней плиты). В итоге мы имеем три гармоники со своими амплитудами, жестко связанных между собой своим коэффициентом пропорциональности. При работоспособном состоянии пролета эти коэффициенты не меняются.

Если изменился коэффициент только у одного из тензорезисторов – значит неисправен тензорезистор. Контроль правильности показаний акселерометра ведется по-другому (см. предыдущий раздел). Вертикальный акселерометр должен показывать ускорение силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Погрешность не более 1%. Если погрешность более 1% – то акселерометр неисправен.

Таким образом диагностируется отказ любого одного датчика, канал помечается как неисправный, и тревога не инициируется. Надежность подсистемы контроля деформаций удастся повысить до приемлемого уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Авторами настоящего исследования проанализирована работа действующих систем мониторинга инженерных конструкций на различных объектах транспортной и гражданской инфраструктуры, с целью оценки влияния факторов, снижающих надежность функционирования подобных систем мониторинга, и даны практические рекомендации по устранению их влияния. Таким образом, цель работы достигнута.

Ввиду вышеперечисленного выводы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Среди основных причин, снижающих надежность функционирования СММК, следует выделить жесткие требования по метрологическим поверкам (обычно ежегодным), а также ложные срабатывания датчиков (что в целом присуще сложным техническим системам).

2. На примере акселерометра-инклинометра АЦт90 дано предложение по использованию встроенной методики калибровки, которая работает каждую секунду. Данное предложение математически и технически обосновано в настоящей статье. Демонтаж, транспортировка, периодическая поверка, обратная транспортировка, монтаж, по сравнению со встроенной методикой калибровки снижают надежность системы мониторинга, а еще увеличивают трудозатраты и стоимость работ.

3. Ложные срабатывания датчиков следует признать штатным инцидентом функционирования СММК. Учет данного инцидента возможен программным способом, в частности, по предложенным в статье алгоритмам, а также путем анализа и сопоставления данных с датчиков, базирующихся на разных физических основах.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сырков А.В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений // Автоматизация в промышленности. 2014. № 2. С. 34–38. EDN: RVDMQP
2. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г. Мониторинг транспортных сооружений // Инновационный транспорт. 2015. № 1 (15). С. 30–34. ZUUORA. EDN: TMMISZ
3. Белый А.А., Белов А.А., Осадчий Г.В., и др. Автоматизация процесса управления техническим состоянием искусственных сооружений Санкт-Петербурга за счет применения средств инструментального мониторинга // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 3. С. 380–406. EDN: YOTBML
4. Яшнов А.Н., Кузьменков П.Ю., Иванов Е.О. Развитие мониторинга технического состояния мостов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 7. С. 14–18. EDN: MFHXBN
5. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений. М.: МАДИ, 2021. EDN: YNSWFT

6. Сырков А.В., Крутиков О.В. Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга // Автоматизация в промышленности. 2012. № 9. С. 45–50. EDN: PCNRCP
7. Белый А.А., Долинский К.Ю., Осадчий Г.В. Система мониторинга инженерных конструкций при строительстве тоннеля под рекой Смоленка (г. Санкт-Петербург) // Геотехника. 2016. № 2. С. 18–27. EDN: VZVZDT
8. Осадчий Г.В., Белый А.А., Ефанов Д.В., Шестовицкий Д.А. Мониторинг технического состояния раздвижной крыши стадиона «Санкт-Петербург арена» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 6 (69). С. 10–24. doi: 10.18720/CUBS.69.2 EDN: YMRHPV
9. Белый А.А., Белов А.А., Яценко А.И., Антонюк А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. 2020, № 45(71). С. 38–45. EDN: ZDBIAB
10. Аганов И.А., Осадчий Г.В., Ефанов Д.В., и др. Система мониторинга инженерных конструкций на Пуровском мосту // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2021. № 5–6 (96–97). С. 47–51. EDN: UFDFOE
11. Гусев Г.Н. Деградация датчиков в системе интеллектуального деформационного мониторинга и метод ее диагностики. В кн.: Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций. Пермь, 2024. С. 136–137. EDN: CLOJBF
12. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г., Антонюк А.А. Технический аспект работы акселерометров в составе системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 401–418. doi: 10.17816/transsyst630992 EDN: JOSNEC
13. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г. Оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2025. № 62 (88). С. 28–34. EDN: ZQXSOZ
14. Бушуев С.В., Ускова М.Л., Попов А.Н. Оценка влияния систем технической диагностики и мониторинга на надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 68–72. EDN: SVNLDD
15. Донец Н.А., Афанасьев В.С. Оценка экономической эффективности мониторинга технического состояния мостовых сооружений. Часть 1 // Транспортное строительство. 2016. № 1. С. 15–17. EDN: VOOPVT
16. Донец Н.А., Афанасьев В.С. Экономическая эффективность мониторинга технического состояния мостовых искусственных сооружений. Часть 2 // Транспортное строительство. 2016. № 2. С. 2–4. EDN: VOOPYV

17. Ефанов Д.В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 1. С. 124–148. EDN: VXJDHV
18. Луговцев Е.А., Ерофеев М.Н. Опыт применения измерительного комплекса «Система измерений для проверки постоянных мостов» для определения возможности пропуска по постоянным мостам сверхтяжелых нагрузок // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6, № 3. С. 17. EDN: LAALGK
19. Шмидт А.А., Косырев А.В. Анализ научно-методического аппарата диагностики и контроля, мониторинга и прогнозирования технического состояния военной техники связи // Техника средств связи. 2023. № 4 (164). С. 81–92. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-4-81-92 EDN: IJFBO
20. Данилов А.А. Направления совершенствования измерительных систем и их метрологического обеспечения // Измерительная техника. 2023. № 8. С. 24–29. doi: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29 EDN: CVDWFO
21. Калашников А.А. Модульные системы и цифровые технологии автоматизированного метрологического обеспечения АСУТП атомных станций: дисс. ... д.т.н. / Москва, 2024. EDN: UFQHUF
22. Киргинцева Т.А., Иванов С.А. Разбор основных вопросов, возникающих при периодической поверке приборов учета тепловой энергии и теплоносителя. В кн.: Энергетика в современном мире. материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. 12–13 декабря 2019 г. Чита, 2019. С. 76–79. EDN: RYVHLB
23. Макашева С.И. Автоматизированная система мониторинга как инструмент бережливого производства системы тягового электроснабжения // Электротехника. 2016. № 2. С. 52–55. EDN: VKSLJP
24. Атрощенко В.А., Дьяченко Р.А., Багдасарян Р.Х., Решетняк М.Г. К вопросу оценки надежности системы мониторинга электроэнергетического комплекса коттеджного поселка // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 236. EDN: RXUPPJ
25. Шахкамян А.С., Шахкамян Н.А., Бегоян Л.К. Особенности поверки и калибровки цифровых термометров // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2019. № 2. С. 80–88. EDN: VXUIBK
26. Авторское свидетельство РФ 1830462 / 30.07.1993. Лобов Б.И., Овчинников А.Г. Устройство для поверки и градуировки трубопоршневых установок. EDN: BLQTHK
27. Парфеньева И.Е., Аксенов А.Н. Анализ достоверности и поверки средств измерения давления // Технические науки - от теории к практике. 2013. № 19. С. 116–129. EDN: PYFZJV
28. Максимов И.Г., Астапов В.Н., Второва Л.И. Надежность систем мониторинга активного оборудования // Международный студенческий научный вестник. 2024. № 6. С. 44. EDN: BBHUSJ

REFERENCES

1. Syrkov AV. Ways of development of automated systems for operation and maintenance of road artificial structures. *Avtomatizatsiia v Promyshlennosti*. 2014;(2):34–38. (In Russ.) EDN: RVDMPQ
2. Nigmatova OI, Ovchinnikov IG. Monitoring of transport structures. *Innovatsionnyi Transport*. 2015;1(15):30–34. (In Russ.) EDN: TMMISZ
3. Belyi AA, Belov AA, Osadchii GV, et al. Automation of the technical condition management process for artificial structures in St. Petersburg through the use of instrumental monitoring tools. *Avtomatika na Transporte*. 2018;4(3):380–406. (In Russ.) EDN: YOTBML
4. Iashnov AN, Kuz'menkov PIu, Ivanov EO. Development of monitoring of the technical condition of bridges. *Put' i Putevoe Khoziaistvo*. 2021;(7):14–18. (In Russ.) EDN: MFHXBH
5. Vasil'ev AI. *Monitoring of the Technical Condition of Bridge Structures*. Moscow: MADi; 2021. (In Russ.) EDN: YNSWFT
6. Syrkov AV, Krutikov OV. Optimization of the life cycle of the bridge to Russky Island in Vladivostok using risk analysis and monitoring. *Avtomatizatsiia v Promyshlennosti*. 2012;(9):45–50. (In Russ.) EDN: PCNRCP
7. Belyi AA, Dolinskii KIu, Osadchii GV. Monitoring system for engineering structures during the construction of the tunnel under the Smolenka River (St. Petersburg). *Geotekhnika*. 2016;(2):18–27. (In Russ.) EDN: VZVZDT
8. Osadchii GV, Belyi AA, Efanov DV, Shestovitskii DA. Monitoring of the technical condition of the retractable roof of the St. Petersburg Arena stadium. *Stroitel'stvo Unikal'nykh Zdanii i Sooruzheniy*. 2018;6(69):10–24. (In Russ.) doi: 10.18720/CUBS.69.2 EDN: YMRHPV
9. Belyi AA, Belov AA, Iashchenko AI, Antoniuk AA. Integral monitoring of the Alexander Nevsky Bridge. *Putevoi Navigator*. 2020;45(71):38–45. (In Russ.) EDN: ZDBIAB
10. Aganov IA, Osadchii GV, Efanov DV, et al. Engineering structures monitoring system on the Purovsky Bridge. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o Nauke, Praktike, Ekonomike*. 2021;(5-6):47–51. (In Russ.) EDN: UFDFOE
11. Gusev GN. Degradation of sensors in an intelligent strain monitoring system and a method for its diagnostics. In: *Mechanics of Deformable Solids in the Design of Materials and Structures*. Perm; 2024:136–137. (In Russ.) EDN: CLOJBF
12. Makhon'ko AA, Lazarev IuG, Antoniuk AA. Technical aspect of the operation of accelerometers as part of the engineering structures monitoring system for the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal on the alignment of the “Western High-Speed Diameter” highway in St. Petersburg. *Innovatsionnye Transportnye Sistemy i Tekhnologii*. 2024;10(3):401–418. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst630992 EDN: JOSNEC
13. Makhon'ko AA, Lazarev IuG. Assessment of the operability of the engineering structures monitoring system for the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal on the alignment of the “Western High-Speed Diameter” highway in St. Petersburg. *Putevoi Navigator*. 2025;62(88):28–34. (In Russ.) EDN: ZQXSOZ

14. Bushuev SV, Uskova ML, Popov AN. Assessment of the influence of technical diagnostic and monitoring systems on the reliability of railway automation and remote control devices in operation. *Transport Urala*. 2014;3(42):68–72. (In Russ.) EDN: SVNLDD
15. Donets NA, Afanas'ev VS. Assessment of the economic efficiency of monitoring the technical condition of bridge structures. Part 1. *Transportnoe Stroitel'stvo*. 2016;(1):15–17. (In Russ.) EDN: VOOPTV
16. Donets NA, Afanas'ev VS. Economic efficiency of monitoring the technical condition of bridge artificial structures. Part 2. *Transportnoe Stroitel'stvo*. 2016;(2):2–4. (In Russ.) EDN: VOOPIV
17. Efanov DV. Formation and development prospects of functional control and monitoring systems for railway automation and remote control devices. *Avtomatika na Transporte*. 2016;2(1):124–148. (In Russ.) EDN: VXJDHV
18. Lugovtsev EA, Erofeev MN. Experience in using the measuring system “Measurement System for Permanent Bridge Inspection” to determine the possibility of passing super-heavy loads over permanent bridges. *Transportnye Sooruzheniia*. 2019;6(3):17. (In Russ.) EDN: LAALGK
19. Shmidt AA, Kosyrev AV. Analysis of the scientific and methodological apparatus for diagnostics and control, monitoring and forecasting of the technical condition of military communication equipment. *Tekhnika Sredstv Sviazi*. 2023;4(164):81–92. (In Russ.) doi: 10.24412/2782-2141-2023-4-81-92 EDN: IJFBO
20. Danilov AA. Directions for improving measuring systems and their metrological support. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2023;(8):24–29. (In Russ.) doi: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29 EDN: CVDWFO
21. Kalashnikov AA. *Modular Systems and Digital Technologies for Automated Metrological Support of Automated Process Control Systems at Nuclear Power Plants* [dissertation] Moscow; 2024. (In Russ.) EDN: UFQHUF
22. Kirgintseva TA, Ivanov SA. Analysis of the main issues arising during periodic verification of heat energy and coolant meters. In: *Energy in the Modern World: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference; December 12–13, 2019; Chita*. Chita; 2019:76–79. (In Russ.) EDN: RYVHLB
23. Makasheva SI. Automated monitoring system as a lean production tool for the traction power supply system. *Elektrotekhnika*. 2016;(2):52–55. (In Russ.) EDN: VKSLJP
24. Atroshchenko VA, D'yachenko RA, Bagdasarian RKh, Reshetniak MG. On the issue of assessing the reliability of the monitoring system for the electric power complex of a cottage village. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniia*. 2013;(2):236. (In Russ.) EDN: RXUPPJ
25. Shakhkamian AS, Shakhkamian NA, Begoyan LK. Features of verification and calibration of digital thermometers. *Vestnik Natsional'nogo Politekhnikeskogo Universiteta Armenii. Elektrotekhnika, Energetika*. 2019;(2):80–88. (In Russ.) EDN: BXUIBK
26. Author's Certificate USSR 1830462 / 30.07.1993. Lobov BI, Ovchinnikov AG. Device for verification and calibration of pipe-prover units. (In Russ.) EDN: BLQTHK

27. Parfen'eva IE, Aksenov AN. Analysis of the reliability and verification of pressure measuring instruments. *Tekhnicheskie Nauki – ot Teorii k Praktike*. 2013;(19):116–129. (In Russ.) EDN: PYFZJV
28. Maksimov IG, Astapov VN, Vtorova LI. Reliability of active equipment monitoring systems. *Mezhdunarodnyi Studencheskii Nauchnyi Vestnik*. 2024;(6):44. (In Russ.) EDN: BBHUSJ

Сведения об авторах:

Белый Андрей Анатольевич; д.т.н., доцент, академик РАТ, академик МАТ;

eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;

E-mail: andbeliy@mail.ru

Павлов Евгений Иридиевич; к.т.н.

E-mail: eu.pavlov@mail.ru

Information about the authors:

Andrei A. Belyi; Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Academic of Russian Transport Academy, Academic of International Transport Academy;

eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;

E-mail: andbeliy@mail.ru

Evgenyi I. Pavlov; Candidate of Technical Sciences;

E-mail: eu.pavlov@mail.ru