

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst630992>

© А.А. Махонько¹, Ю.Г. Лазарев², А.А. Антонюк³

¹ ООО «ОСА-Север»

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³ Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

**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**

Цель. Анализ работы действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные.

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

Результаты. Представлен анализ действующей системы мониторинга инженерных конструкций с описанием проблемы возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометры фиксируют ускорения колебаний, превышающие предельные значения. Предложена оценка надежности системы мониторинга инженерных конструкций путем классификации полученных данных с акселерометра на две группы. Определена перспектива дальнейших исследований для более детального изучения причин возникновения проблемы.

Заключение. Полученные результаты исследования можно использовать при проектировании и устройстве систем мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах, а также при модернизации и оптимизации действующих систем мониторинга для улучшения качества оценки технического состояния конструкций.

Ключевые слова: мониторинг искусственных сооружений; управление техническим состоянием; объект транспортной инфраструктуры; вантовый мост; напряженно-деформированное состояние; акселерометр; вибрационный мониторинг.

Как цитировать:

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

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© A.A. Makhonko¹, Y.G. Lazarev², A.A. Antonyuk³

¹ Highway Operator Nord, LLC

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

³ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

TECHNICAL ASPECT OF THE OPERATION OF ACCELEROMETERS AS COMPOSITION OF A SYSTEM FOR MONITORING ENGINEERING STRUCTURES OF A CABLE-STAYED BRIDGE OVER THE PETROVSKY CANAL IN THE CONSTRUCTION OF THE WESTERN SPEED DIAMETER HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

Aim. This study analyzes the current monitoring system for the engineering structures of a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal, part of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg, focusing on emergency situations where accelerometers on pylons record values that exceed limits.

Methods and Materials. The study utilizes statistical data from existing monitoring system databases. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying theoretical scientific methods including analytical techniques, mathematical statistics, and induction.

Results. The analysis presents an overview of the current system used for monitoring engineering structures and highlights issues related to emergency situations in which accelerometer readings exceed threshold values. This study proposes a method for assessing the reliability of the monitoring system by classifying the data obtained from the accelerometer into two groups. The research identifies the need for further investigations to understand the root causes of these issues.

Conclusion. The results can assist in the design and installation of monitoring systems of the engineering structures for cable-stayed bridges, as well as for modernization and optimization of existing monitoring systems to improve the quality of structural technical condition assessments.

Keywords: structural artificial monitoring; technical condition management; transport infrastructure object; cable-stayed bridge; stressed-deformed condition; accelerometer; vibration monitoring.

To cite this article:

Makhonko AA, Lazarev YG, Antonyuk AA. Technical aspect of the operation of accelerometers as composition of a system for monitoring engineering structures of a cable-stayed bridge over the Petrovsky canal in the construction of the Western Speed Diameter highway in St. Petersburg. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):401–418. doi: 10.17816/transsyst630992

ВВЕДЕНИЕ

Система мониторинга инженерных конструкций (СМИК) представляет собой технологию информационного обеспечения принятия решений по управлению параметрами состояния мостового сооружения на всех стадиях жизненного цикла, реализуемых посредством систематического или периодического слежения (наблюдения) за техническим состоянием конструкций [1–6].

Использование СМИК является обязательным условием при реализации любого объекта транспортной инфраструктуры, относящегося к внеклассным сооружениям, к которым, в свою очередь, относятся вантовые мосты. Система мониторинга инженерных конструкций реализуется для обеспечения требуемого уровня безопасности, в том числе снижением риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде.

Основным показателем работоспособности СМИК является ее надежность, а именно свойство системы сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в соответствии с заданными целями и условиями применения. При высокой степени надежности системы уменьшается риск возникновения нештатных ситуаций, который, в свою очередь, может привести к аварийным ситуациям, т.е. состояниям эксплуатируемого объекта, которые характеризуются нарушением пределов и (или) условий безопасности эксплуатации, при которых все неблагоприятные влияния источников опасности на персонал, население и окружающую среду удерживаются в приемлемых пределах посредством соответствующих технических средств, предусмотренных проектом. Иными словами, система мониторинга инженерных конструкций должна обеспечивать возможность детальной оценки технического состояния сооружения в момент наступления нештатных ситуаций с последующей оценкой рисков в кратчайшие сроки для недопущения ухудшения потребительских свойств мостового сооружения [7–10].

При использовании действующей СМИК вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге авторами неоднократно была зафиксирована нештатная ситуация, при которой датчиками-акселерометрами, расположенными в верхних точках пилонов, фиксируются значения, превышающие предельно допустимые.

В данной статье изучен вопрос возникновения исследуемой проблемы, проведен статистический анализ и составлен план для детального

изучения причин возникновения явления с последующей оптимизацией и усовершенствованием действующей системы мониторинга инженерных конструкций.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРА В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При мониторинге конструкций вантового моста особое внимание следует уделять динамическим воздействиям и анализу причин их возникновения. Необходимо оценивать элементы сооружения, которые наиболее податливы к динамическим нагрузкам: пилоны, пролетное строение [11–13].

В действующей системе мониторинга инженерных конструкций за сбор и оценку динамических показателей отвечает подсистема изменения динамических показателей. На Рис. 1 представлена схема расположения акселерометров на вантовом мосту.

В свою очередь, в подсистему изменения динамических показателей входят акселерометры, расположенные в верхних точках пилонов, в середине и в четверти пролетных строений.

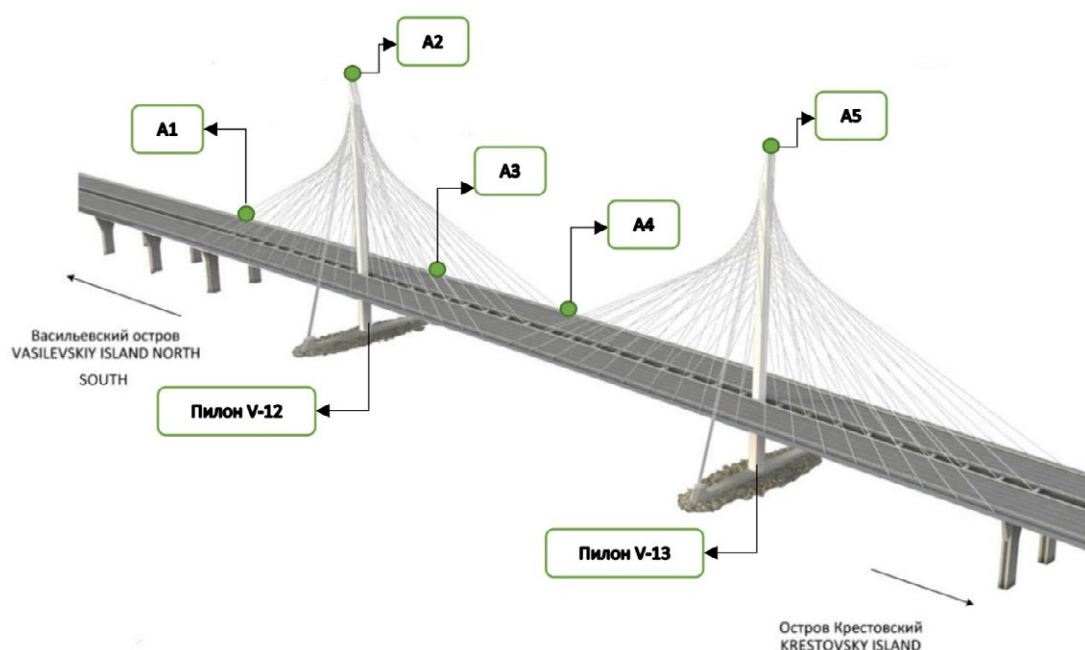


Рис. 1. Схема расположения акселерометров на вантовом мосту через Петровский канал

Fig. 1. Scheme of accelerometers location on the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal

Подсистема изменения динамических показателей выдает динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений колебаний при помощи акселерометров. Датчик измеряет в двух направлениях (X и Y) с регулируемой частотой дискретизации от 0 до 160 Гц при диапазоне изменений $\pm 3g$. Измерения производятся продолжительностью 30 минут, после чего определяется максимальное значение, которое отображается на графике. При возникновении нештатной ситуации, когда датчик фиксирует значения, превышающие предельные, запись показаний производится с частотой 50 Гц с временным интервалом в 10 минут [14–17].

На Рис. 2 показан график изменения ускорений колебаний пилона при значениях, превышающих предельные.

При эксплуатации действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге авторами неоднократно замечались нештатные ситуации, связанные с фиксацией ускорений колебаний пилонов, превышающих предельные значения. В следующем разделе приведена оценка надежности подсистемы изменения динамических показателей, основанная на разделении полученных данных ускорений колебаний на две группы [18–19].

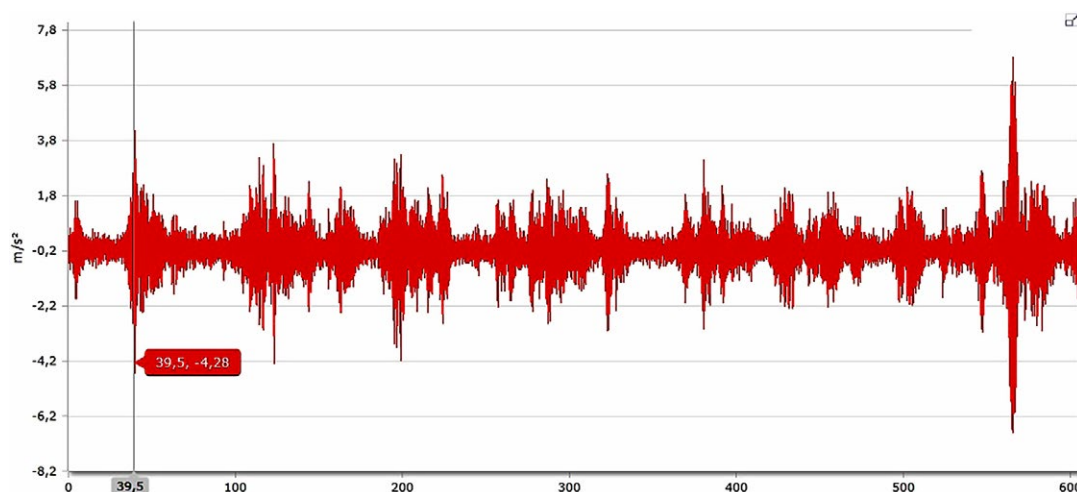


Рис. 2. График изменения ускорений колебаний на пилоне при превышении предельных значений

Fig. 2. Graph of change of vibration accelerations on the pylon at exceeding the limit values

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Анализ полученных ускорений колебаний показал, что все нештатные ситуации можно разделить на две группы.

К первой группе относятся случаи, в которых срабатывание аварийной системы вызвано динамическим воздействием на сооружение.

На Рис. 3 представлен график изменения ускорений колебаний пилона V-12 вдоль оси Y, полученных акселерометром A2. Горизонтальными линиями показаны пороговые значения ускорений ($\pm 2,5 \text{ м/с}^2$), которые были посчитаны в расчетной модели при проектировании.

На представленном графике отсутствуют локализованные области резкого изменения значений ускорений, что свидетельствует о наполненности сигнала. Для подтверждения того, что срабатывание системы обосновано в конкретном случае, возможно использовать метод анализа, основанного на теории вероятности. Для это следует построить функцию плотности вероятности случайных величин для рассматриваемого сигнала, которая представлена на Рис. 4.

Из графика видно, что распределение близко к нормальному с около нулевым значением математического ожидания. Весь диапазон регистрируемых ускорений (от -5 м/с^2 до $+5 \text{ м/с}^2$) является равномерно

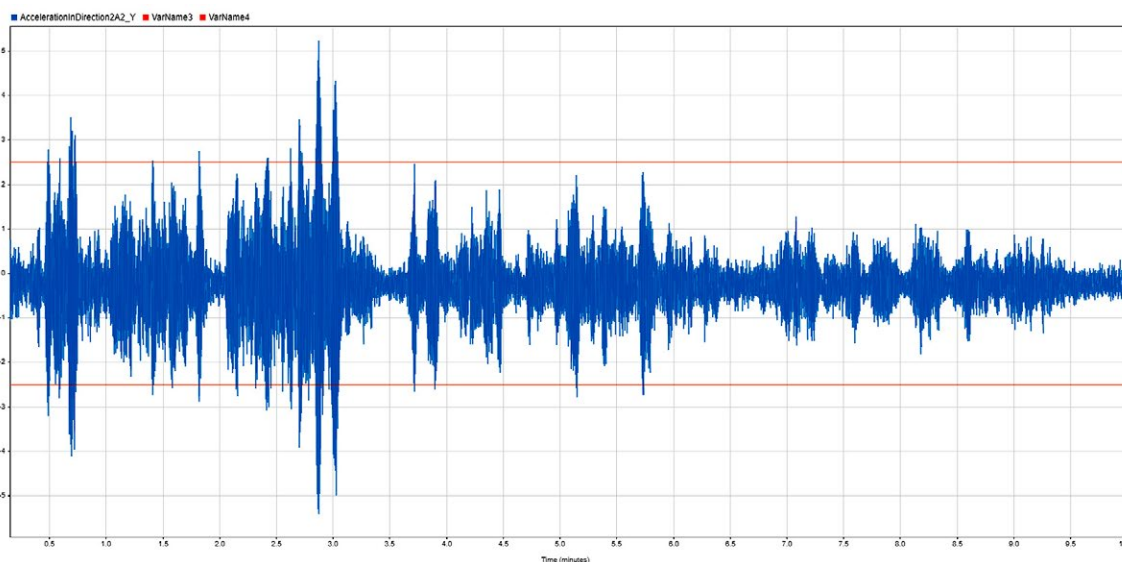


Рис. 3. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12, полученных акселерометром A2

Fig 3. Graph of change of vibration accelerations on the V-12 pylon obtained from accelerometer A2



Рис. 4. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала акселерометра A2

Fig 4. Probability density function of random variables for the signal from accelerometer A2

заполненным, о чем можно судить по сливающимся оранжевым точкам на графике Рис. 4. В окрестностях экстремальных значений есть некоторое количество отдельно стоящих точек, что может свидетельствовать о наличии случайных ошибок в процессе измерений. Несмотря на это, можно считать, что срабатывание аварийной системы в данном случае является обоснованным, поскольку статистически достоверные данные значения экстремальных ускорений лежат за пределами пороговых значений.

Для наглядности приводится еще один пример обоснованного срабатывания системы на пилоне V-13 (акселерометр A5), показанный на Рис. 5 и 6.

Стоит отметить, что в данном случае количество случайных выбросов несколько выше, однако, срабатывание аварийной системы все еще можно считать обоснованным.

Ко второй группе случаев срабатывания аварийной системы относятся нештатные ситуации, когда срабатывание системы вызвано ошибками/сбоями в работе акселерометров, которые в дальнейшем будем обозначать термином – выброс.

Пример такого срабатывания системы показан на Рис. 7. Хорошо видно, что пороговые значения превышаются только отдельными сильно локализованными экстремумами значений ускорений.

Строгий вывод о том, что превышение пороговых значений возникло в результате выбросов, также может быть сделан при использовании методов анализа, основанных на теории вероятности. На Рис. 8 представлен график функции плотности вероятности для описываемого сигнала.

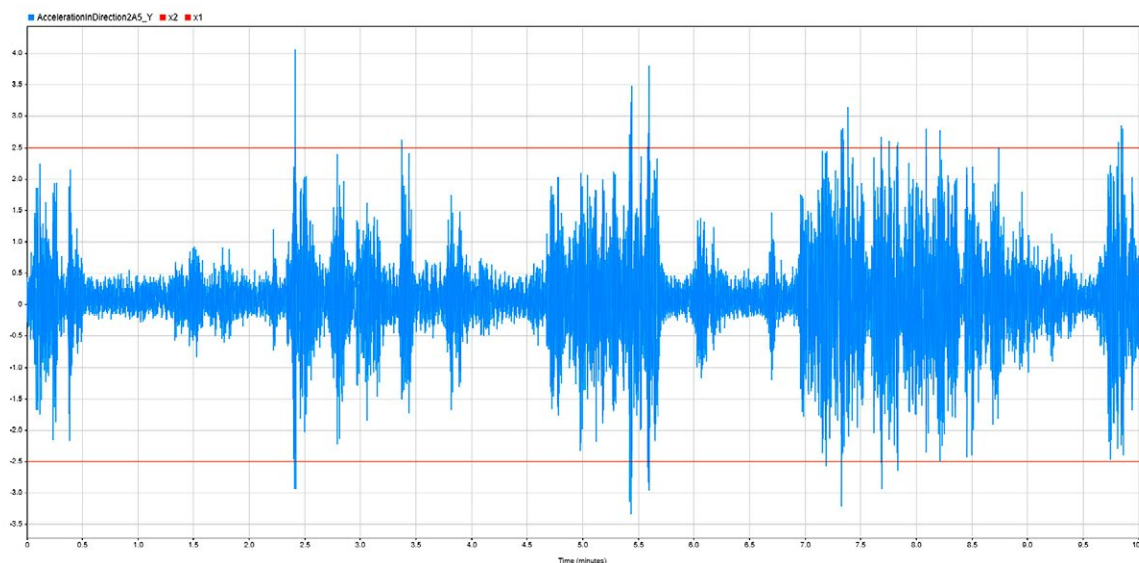


Рис. 5. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-13, полученных акселерометром A5

Fig 5. Graph of the change in vibration accelerations on the V-13 pylon obtained from accelerometer A5

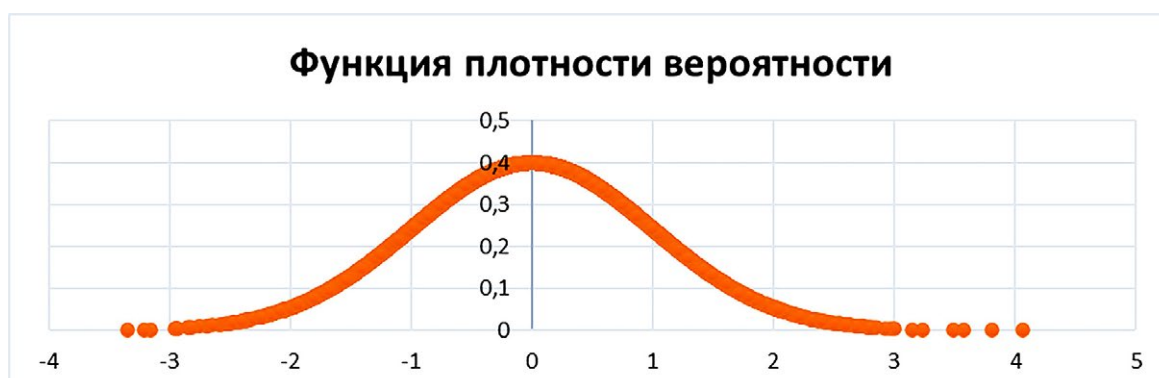


Рис. 6. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала акселерометра A5

Fig 6. Probability density function of random variables for the signal from accelerometer A5

Из графика видно, что функция плотности вероятности заполнена только в центральной околонулевой части. Область максимальных ускорений описывается одной точкой, область минимальных значений – 3 точками из диапазона от минус 2 до минус 9 м/с^2 ($-2 \text{ м/с}^2 - -9 \text{ м/с}^2$).

Далее приведен статистический анализ нештатных ситуаций за весь период эксплуатации.

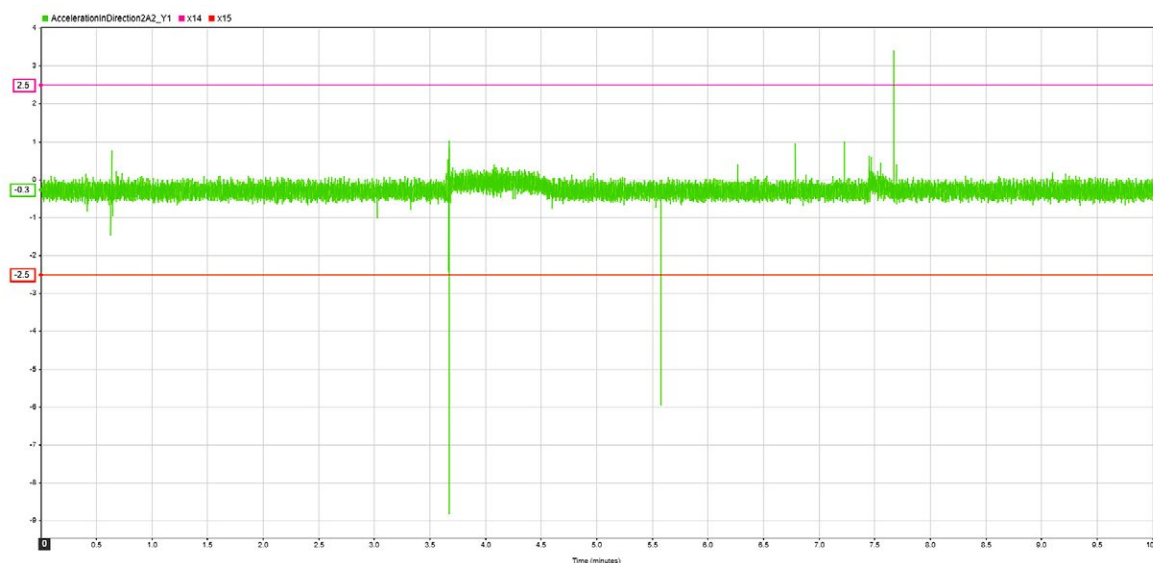


Рис. 7. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12, полученных акселерометром A2

Fig 7. Graph of change of vibration accelerations on the V-12 pylon obtained from accelerometer A2

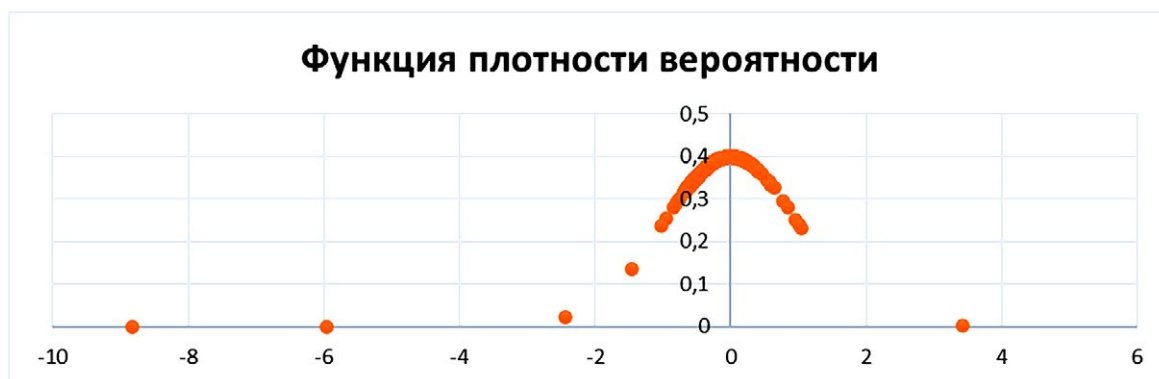


Рис. 8. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала акселерометра A2

Fig 8. Probability density function of random variables for the signal from accelerometer A2

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ПИЛОНАХ

Статистический анализ производился по полученным данным акселерометров, расположенных в верхних точках пилонов за весь период эксплуатации вантового моста. За период с 08.2017 по 05.2023 включительно произошло 671 срабатывание аварийной системы.

Для детальной проработки весь статистический анализ разбивается на 3 этапа. На 1 этапе оценивались количественные показатели срабатываний по каждому из датчиков. После данной операции производился анализ даты и времени для определения времени года и времени суток, чтобы оценить зависимость срабатывания системы от температуры окружающей среды и интенсивности временной нагрузки, которая значительно изменяется в часы пик.

В Табл. 1 приведена выкладка результатов по 1 этапу статистического анализа.

Таблица 1. Результаты статистического анализа 1 этап

Table 1. Results of statistical analysis stage 1

№ п/п	Сработавший акселерометр		Время года				Время суток			
	A2	A5	Лето	Осень	Зима	Весна	Утро	День	Вечер	Ночь
1.	448	223	—	—	—	—	—	—	—	—
2.	—	—	217	132	178	144	—	—	—	—
3.	—	—	—	—	—	—	104	234	213	120
Общее количество срабатываний			671							

Из результатов видно, что превалирует срабатывание акселерометра A2, расположенного на пилоне V-12, в большей степени в дневное время в летний период, что свидетельствует о влиянии

СРАБАТЫВАНИЕ СИСТЕМЫ (АКСЕЛЕРОМЕТР)

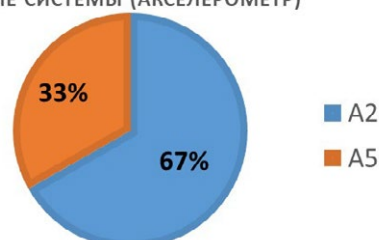


Рис. 9. Диаграмма результатов. Процентное соотношение количеств срабатываний системы между акселерометров A2 и A5

Fig 9. Results diagram. Percentage ratio of the number of system activations between accelerometers A2 and A5

СРАБАТЫВАНИЕ СИСТЕМЫ (ВРЕМЯ ГОДА)

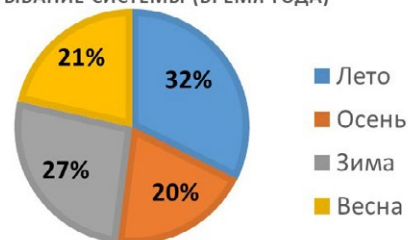


Рис. 10. Диаграмма результатов. Процентное соотношение количеств срабатываний системы по временам года

Fig 10. Results diagram. Percentage ratio of the number of system activations by season

СРАБАТЫВАНИЕ СИСТЕМЫ (ВРЕМЯ СУТОК)

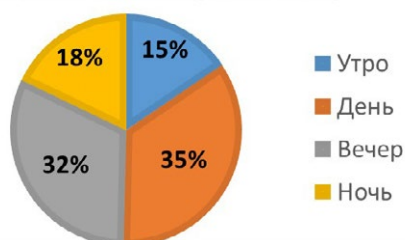


Рис. 11. Диаграмма результатов. Процентное соотношение количеств срабатываний системы по времени суток

Fig 11. Results diagram. Percentage ratio of the number of system activations by time of day

температуры окружающей среды на срабатывание аварийной системы. Также стоит сделать вывод, что на срабатывание системы не влияет интенсивность временной нагрузки, так как максимальная интенсивность движения по вантовому мосту происходит в утренние часы.

На этапе 2 статистического анализа производилась классификация обрабатываемых данных по двум группам срабатывания аварийной системы, описанных выше. Из полученных результатов, отраженных в Табл. 2, следует, что обоснованное срабатывание аварийной системы фиксируется акселерометром А2 в зимний период в дневное и вечернее время суток и составляет 22,95% от общего числа срабатываний системы, что подтверждает выводы, сделанные по 1 этапу анализа и указывает на необходимость проведения 3 этапа статистического анализа, связанного с оценкой влияния ветрового потока.

Таблица 2. Результаты статистического анализа 2 этап

Table 2. Results of statistical analysis stage 2

№ п/п	Сработавший акселерометр		Время года				Время суток			
	А2	А5	Лето	Осень	Зима	Весна	Утро	День	Вечер	Ночь
1.	113	41	—	—	—	—	—	—	—	—
2.	—	—	3	54	72	25	—	—	—	—
3.	—	—	—	—	—	—	32	47	47	28
Кол-во обоснованных срабатываний			154							
% обоснованных срабатываний			22,95%							
% выбросов			77,05%							

Из-за повышенной чувствительности к ветровым нагрузкам необходимо оценить влияния ветрового потока на срабатывание аварийной системы. Для оценки использовались два параметра ветрового потока: скорость и направление. Для наглядности построена роза ветров для 1 группы срабатывания аварийной системы, а также для каждого акселерометра по отдельности. Данные графики представлены на Рис. 12–14. Стоит отметить, что результаты измерений анеморумбометром в СМИК отображаются из учета встречного направления ветра – от края к центру графика.

По результатам анализа розы ветров следует, что обоснованные срабатывания аварийной системы на акселерометре А2 происходят при направлении ветра Север-Северо-восток (0–45 градусов) и Север-Западное направление (315–337,5 градусов), а для акселерометра А5 – Юг-Юго-восток-Юго-запад (157,5–202,5 градусов). Иными словами, на пилон V-12, расположенный на Юге, влияние оказывает северное направление ветра, а на пилон V-13, находящийся на Севере, – Южное. При этом средняя скорость ветра варьируется в диапазоне 15–16 м/с.

ВЫВОДЫ

Авторами проанализирована работа действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский

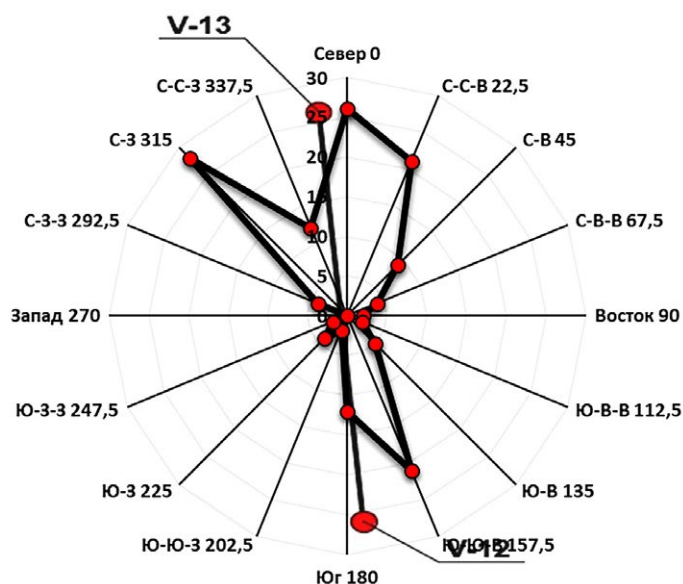


Рис. 12. Роза ветров по 1 группе срабатывания (общий)

Fig 12. Wind rose by 1 triggering group (general)

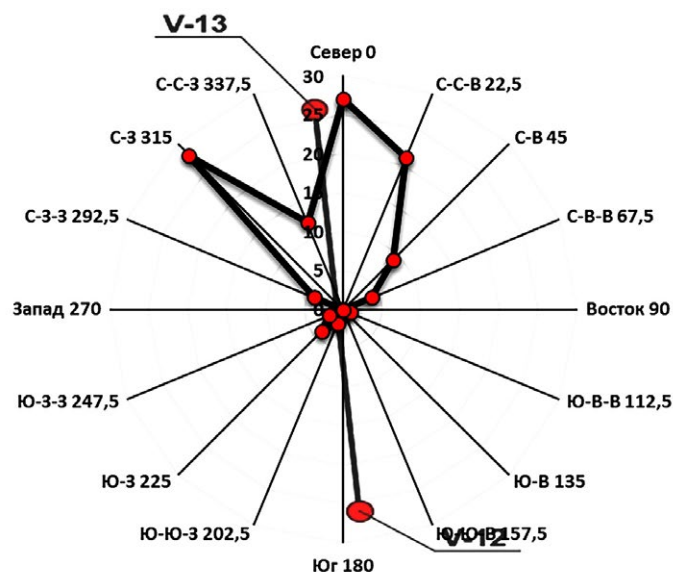


Рис. 13. Роза ветров по 1 группе срабатывания (акселерометр А2)

Fig. 13. Wind rose by 1 triggering group (accelerometer A2)

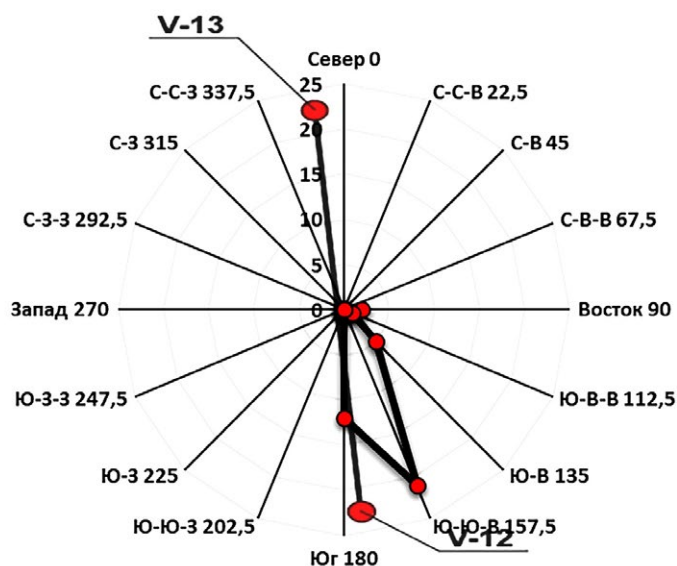


Рис. 14. Роза ветров по 1 группе срабатывания (акселерометр А5)

Fig. 14. Wind rose by 1 triggering group (accelerometer A5)

канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные.

Анализ данных, представленный в статье, позволяет сделать следующие выводы:

1. В большинстве случаев (77,05%) причиной срабатывания аварийной система СМИК являются выбросы – физически не обоснованные превышения пороговых значений, возникающие из-за ошибок в работе измерительных систем.
2. При анализе было получено, что на количество выбросов оказывает влияние температура окружающей среды. Для подтверждения гипотезы необходимо провести натурный эксперимент по измерению температуры в конструкции пилона в месте расположения акселерометра в самый жаркий период времени.
3. В 22,95% случаях установлено, что причины срабатывания аварийной системы СМИК являются физически обоснованными. При этом направление ветра и его скорость, измеренная анеморумбометром в верхней точке пилона, позволяют предположить, что возбуждение конструкции вызвано откликом на турбулентный ветровой поток или срывы вихрей.
4. Для дальнейшего выяснения причин колебаний пилонов необходимо произвести расчеты частот собственных колебаний по полученным данным ускорений и сравнить с проектными значениями.
5. Для адекватной оценки текущего состояния вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге необходимо уменьшить количество выбросов. Для решения этой задачи коллективом авторов принято решение о разработке методики оценки работоспособности систем мониторинга инженерных конструкций с учетом синхронизации работы датчиков СМИК.

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. ГОСТ Р 59943-2021. Дороги общего пользования. Системы мониторинга мостовых сооружений. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. (In Russ.)). Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182099>

2. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. М.: МАДИ, 2021. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf>
3. Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2023. № 56(82). С. 68–77.
4. Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 83–96. doi: 10.17816/transsyst20239283-96
5. Карапетов Э.С., Белый А.А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век». 2008. № 4. С. 80–83. EDN: KZPOXH
6. Васильев А.И. Мониторинг мостовых сооружений. Задачи, возможности, проблемы // Дорожная держава. 2008. № 11. С. 80–82. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf>
7. Иванов Ю.С., Снежков И.И., Чаплин И.В., Яшнов А.Н. Автоматизация процесса определения усилия в вантовых элементах мостов по частотам собственных колебаний // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4. С. 18–25. EDN: ZWDQBR
8. Яшнов А.Н., Баранов Т.М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангара в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1. С. 199–209. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285>
9. Belyi A., Osadchy G., Dolinskiy K. Practical Recommendations for Controlling of Angular Displacements of High-Rise and Large Span Elements of Civil Structures In: Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), 2018 Sept 14-17; Kazan, Russia. IEEE, 2018. P. 176–183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743
10. Брынь М.Я., Никитчин А.А., Толстов Е.Г. Геодезический мониторинг объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 4(29). С. 58–60. EDN: NAXYBX
11. Брынь М.Я., Толстов Е.Г., Никитчин А.А., и др. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2009. Т.19, № 2. С. 120–128. EDN: JTGPFD
12. Белый А.А., Яценко А.И., Антонюк А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. 2020. № 45(71). С. 38–45. EDN: ZDBIAB
13. Гарамов О.В. Длительный приборный мониторинг автодорожных мостов. Проблемы и перспективы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2004. № 1. С. 27–31. EDN: LRHUMR

14. Сырков А.В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений // Автоматизация в промышленности. 2014. № 2. С. 34–38. EDN: RVDMQP
15. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. СПб: ПГУПС, 2016.
16. 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
17. Белый А.А., Белов А.А., Осадчик Г.В., Долинский К.Ю. 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
18. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г., Антонюк А.А. Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 2. С. 421–431. doi: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431
19. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г. Выбор способа фильтрации данных акселерометров системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2024. № 59 (85) С. 66–73. EDN: DPGFVG

REFERENCES

1. State Standard 59943-2021. Automobile roads of general use. Systems of monitoring bridges. Design rules. FGBU “RST”; 2022. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200182099>
2. Vasil’ev AI. *Monitoring tehničeskogo sostojanija mostovyh sooruzhenij*. Moscow: MADI; 2021. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf>
3. Makhonko AA, Malkov AV, Belyi AA, Antonyuk AA. Osobennosti sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobilnoj dorogi “Zapadnyj skorostnoj diametr” v Sankt-Peterburge. *Putevoi navigator*. 2023;56(82);68–77. (In Russ.)
4. Makhonko AA, Malkov AV, Belyi AA, Antonyuk AA. Experience in operating the monitoring system for a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):83–96. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239283-96
5. Karapetov JeS, Belyj AA. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy. *Vestnik “Zodchij. 21 vek”*. 2008; 4;80–83 (In Russ.) EDN: KZPOXH

6. Vasil'ev AI. Monitoring mostovykh sooruzhenij. Zadachi, vozmozhnosti, problem. *Dorozhnaja derzhava*. 11/2008. 2008;(11):80–82. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf>
7. Ivanov YS, Snezhkov II, Shaplin IV, Yashnov AN. Automation Process of Determining the Force in the Cable Elements of Bridges Over Own Frequencies of Vibrations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;4;18–25. (In Russ.) EDN: ZWDQBR
8. Yashnov AN, Baranov TM. Monitoring of Dynamic Behavior of Bridge Across the Angara in Irkutsk. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*. 2017;(1):199–209. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285>
9. Belyi A, Osadchy G, Dolinskiy K. Practical Recommendations for Controlling of Angular Displacements of High-Rise and Large Span Elements of Civil Structures In: *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), 2018 Sept 14–17; Kazan, Russia*. IEEE; 2018:176–183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743
10. Bryn MYa, Nikitchin AA, Tolstov EG. Geodesic monitoring of railway transport infrastructure objects. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2010;4 (29);58–60. (In Russ.) EDN: NAXYBX
11. Bryn MYa, Tolstov EG, Nikitchin AA, et al. Geodetic Monitoring of Cable-Stayed Bridge Deformation on the Basis of GNSS Technologies. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2009;2(19):120–128. (In Russ.) EDN: JTGPFD
12. Belyi AA, Belov AA, Jashhenko AI, Antonyuk AA. Integralny monitoring mosta Aleksandra Nevskogo. *Putevoi navigator*. 2020;45(71);38–45. (In Russ.) EDN: ZDBIAB
13. Garamov OV. Dlitel'nyi pribornyi monitoring avtodorozhnykh mostov. Problemy i perspektivy. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2004;1;27–31 (In Russ.) EDN: LRHUMR
14. Syrkov AV. Puti razvitiya avtomatizirovannykh sistem jekspluatacii i sodержaniya avtodorozhnykh iskusstvennykh sooruzhenij. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2014;2;34–38. (In Russ.) EDN: RVDMQP
15. Efanov DV. *Funkcionalniy kontroli monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki*. St. Petersburg: PGUPS; 2016. (In Russ.)
16. Syrkov AV, Krutikov OV. Optimizacija zhiznennogo cikla mosta na ostrov Russkij vo Vladivostoke sredstvami analiza riskov i monitoring. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2012;9;45–50. (In Russ.) EDN: PCNRCP
17. Belyi AA, Belov AA, Osadchik GV, Dolinsky KYu. Automation of technical condition management process of St. Petersburg artificial constructions with the usage of structural health monitoring tools. *Automation on Transport*. 2018;4;3;380–406. (In Russ.) EDN: YOTBML
18. Makhonko AA, Lazarev YuG, Antonyuk AA. Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024;21(2):421–431. (In Russ.) doi: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431

19. Makhonko AA, Lazarev YG. Vybor sposoba fil'tracii dannyh akselerometrov sistemy monitoringa inzhenernykh konstrukcij vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v g. Sankt-Peterburge. *Putevoi navigator*. 2024;59(85);66–73. (In Russ.) EDN: DPGFVG

Сведения об авторах:

Махонько Андрей Андреевич, начальник отдела дорожного надзора;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com

Лазарев Юрий Георгиевич, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 5456-2574; ORCID: 0000-0002-5616-1191;
E-mail: lazarev_yug@spbstu.ru

Антонюк Анатолий Анатольевич, инженер-исследователь;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Information about the authors:

Andrey Makhonko, head of construction supervision department;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com

Yurij Lazarev, Doctor of Sciences in Engineering, Professor;
eLibrary SPIN: 5456-2574; ORCID: 0000-0002-5616-1191;
E-mail: lazarev_yug@spbstu.ru

Anatoly Antonyuk, engineer;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru