

УДК 624.21

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

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

¹ ООО «Оператор скоростных автомагистралей — Север», Россия, 191186, Санкт-Петербург, пер. Вольнский, 3А, литера А

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: 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. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 421–431. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431

Аннотация

Цель: оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и текущего состояния конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные. **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:** предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и оценки текущего состояния конструкций вантового моста, по данным, полученным с акселерометров. Структурный подход включает три этапа: I — предварительный анализ; II — выборочный анализ; III — детальный анализ. **Практическая значимость:** полученный структурный подход по оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах позволяет уменьшить количество ложных срабатываний системы и оценить текущее состояние мостового сооружения. В рамках III этапа структурного подхода предложена разработка методики оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций с последующей оценкой текущего состояния конструкций вантового моста.

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

Введение

Система мониторинга инженерных конструкций (СМИК) является инструментом информационных технологий для принятия решений по управлению параметрами состояния мостовых конструкций на всех этапах жизненного цикла, особенно в период эксплуатации, путем систематического или периодического контроля (наблюдения) за техническим состоянием мостового сооружения [1–5].

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 внедряется в целях обеспечения необходимого уровня безопасности, в том числе для снижения риска, связанного с возможным причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей среде, близлежащей инфраструктуре и имуществу.

Основным показателем работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций является надежность системы, определяемая как ее способность поддерживать выполнение требуемых функций в течение времени в соответствии с заданными целями и условиями использования. Высокий уровень надежности системы снижает риск возникновения нештатных ситуаций, которые могут привести к появлению аварийных состояний, характеризующихся достижением предельных значений с последующим уменьшением показателя эксплуатационной безопасности [6–10].

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 [10–13].

В данной статье авторами предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста, что позволит уменьшить количество ложных срабатываний системы, а также оценить текущее состояние мостового сооружения.

Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций

При эксплуатации действующей СМИК вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге авторами наблюдались многочисленные нештатные ситуации, связанные со срабатыванием подсистемы динамических показателей, а именно: акселерометры, расположенные на вершинах пилонов, фиксировали ускорение колебаний, превышающих предельные значения.

При анализе нештатных ситуаций авторами предлагается использовать структурный подход к оценке работоспособности СМИК. Этапы структурного подхода представлены на рис. 1.

I этап предполагает выявление закономерностей и зависимостей возникновения с последующей их группировкой. На этапе выборочного анализа важно определить закон распределения вероятностей случайных величин ускорений колебаний пилонов для понимания причин возникновения нештатных ситуаций и поиска инструментов для их количественного снижения. На III этапе предлагается методика оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций с последующей валидацией всех случаев срабатывания СМИК за весь период эксплуатации вантового моста.



Рис. 1. Этапы структурного подхода

Предварительный анализ полученных ускорений колебаний показал, что все срабатывания подсистемы динамических показателей можно разделить на две группы.

К первой группе относятся нештатные ситуации, вызванные динамическим откликом сооружения.

На рис. 2 показан график — акселерограмма изменения ускорений колебаний пилона V-12 вдоль оси Y (направление, перпендикулярное оси моста), полученных с акселерометра, расположенного на вершине пилона. Горизонтальными линиями на графике показаны пороговые значения, равные $\pm 2,5 \text{ м/с}^2$, полученные

из расчетной модели при проектировании сооружения.

На представленном графике видно, что локализованные участки резкого изменения значений ускорений колебаний отсутствуют, что характеризует сигнал как наполненный. Для подтверждения обоснованности срабатывания системы в данном случае авторы используют метод анализа, основанный на теории вероятности. Для этого делается предположение, что случайные величины распределяются по стандартному нормальному закону распределения с последующим построением графика функции плотности вероятности для рассматриваемого сигнала, который представлен на рис. 3.

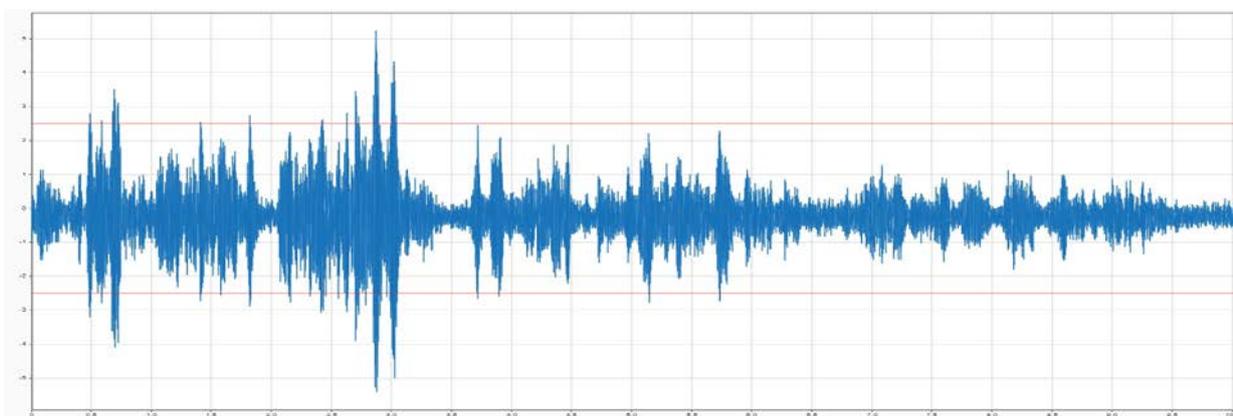


Рис. 2. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12

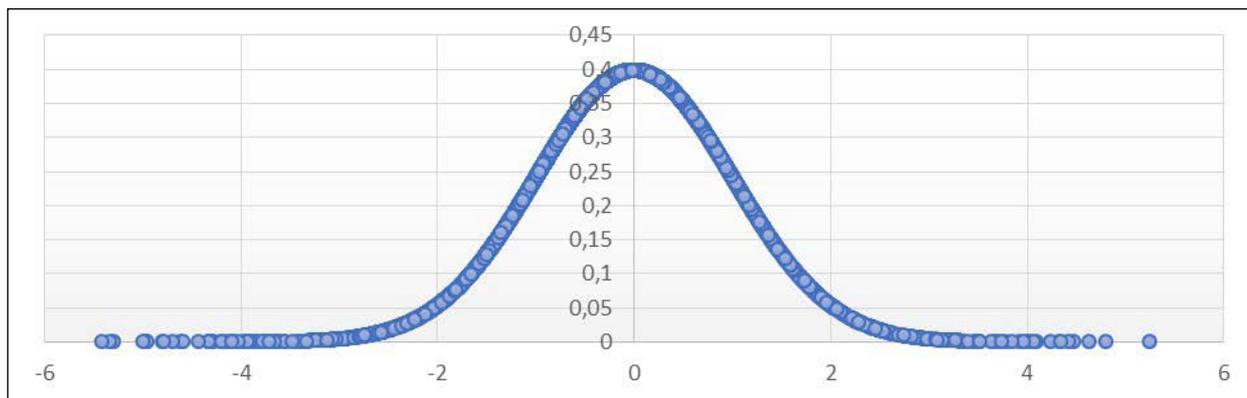


Рис. 3. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра

По графику видно, что случайные величины ускорений колебаний пилона распределяются по закону, близкому к стандартному нормальному с околонулевым значением математического ожидания. Диапазон регистрируемых значений (от -5 м/с^2 до $+5 \text{ м/с}^2$) является равномерно заполненным, что характеризуют сливающиеся синие точки на графике. В окрестностях экстремальных значений ускорений присутствует некоторое количество отдельно стоящих точек, что показывает наличие случайных ошибок

в процессе измерений или передачи сигнала с датчика на преобразователь. В данном случае срабатывание системы СМИК следует считать обоснованным, так как статистически достоверные значения экстремальных ускорений лежат за границей предельных значений.

Далее приводится еще один пример корректного срабатывания СМИК на пилоне V-13. График и функция плотности вероятности представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

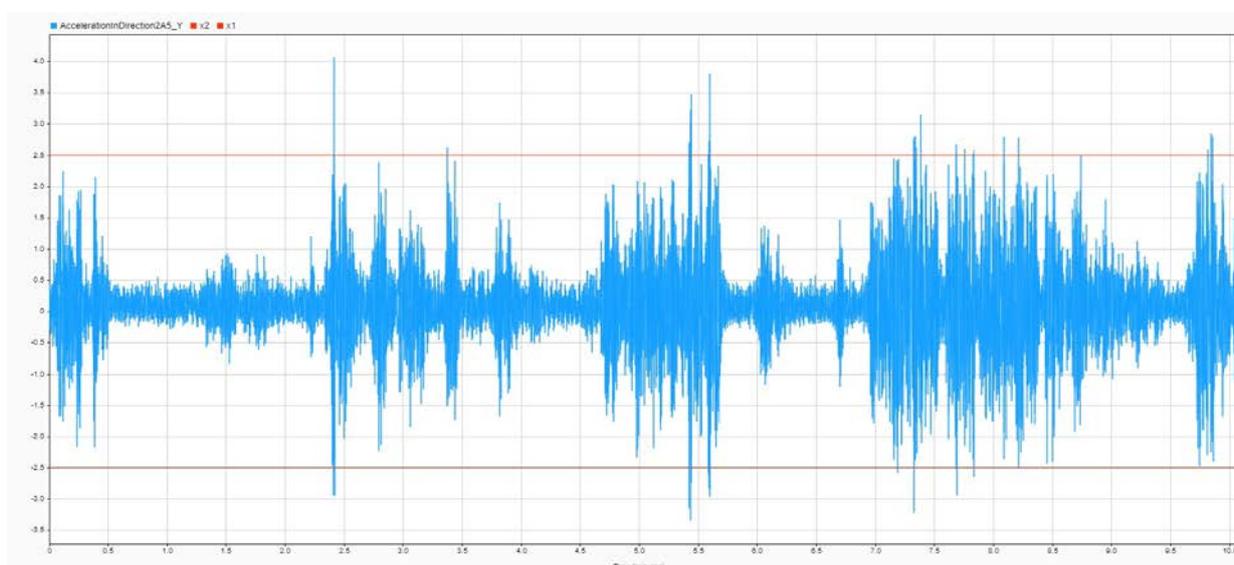


Рис. 4. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-13

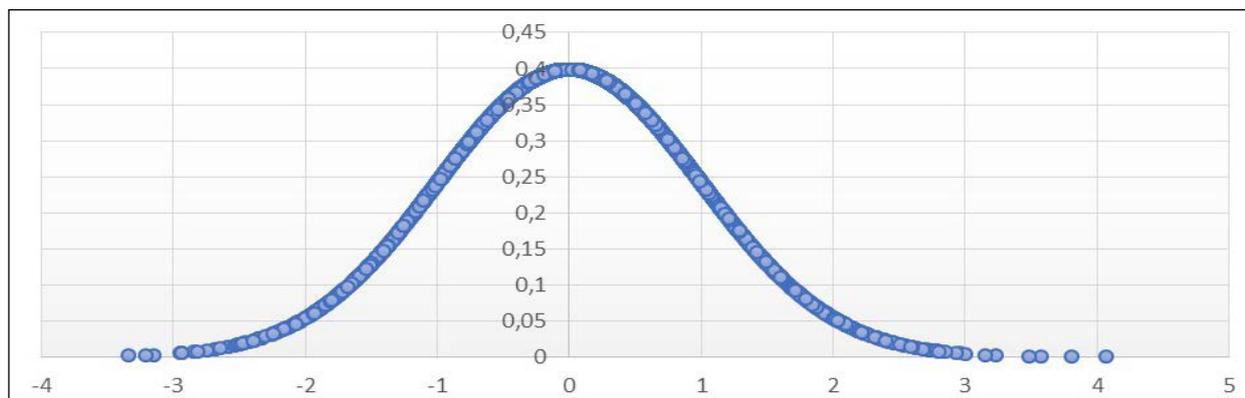


Рис. 5. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра

Из графика функции плотности вероятности видно, что количество случайных ошибок выше, чем в первом случае, однако срабатывание СМИК все еще считается обоснованным.

Ко второй группе нестандартных ситуаций относятся случаи, когда срабатывание системы произошло по причине ошибок/сбоев

в работе акселерометра или преобразователя данных. Такие случаи срабатывания системы будем обозначать термином «выброс».

На рис. 6 показан график — акселерограмма фиксации выброса. На графике видно, что предельные значения превышаются единичными, сильно локализованными экстремумами значениями ускорений.

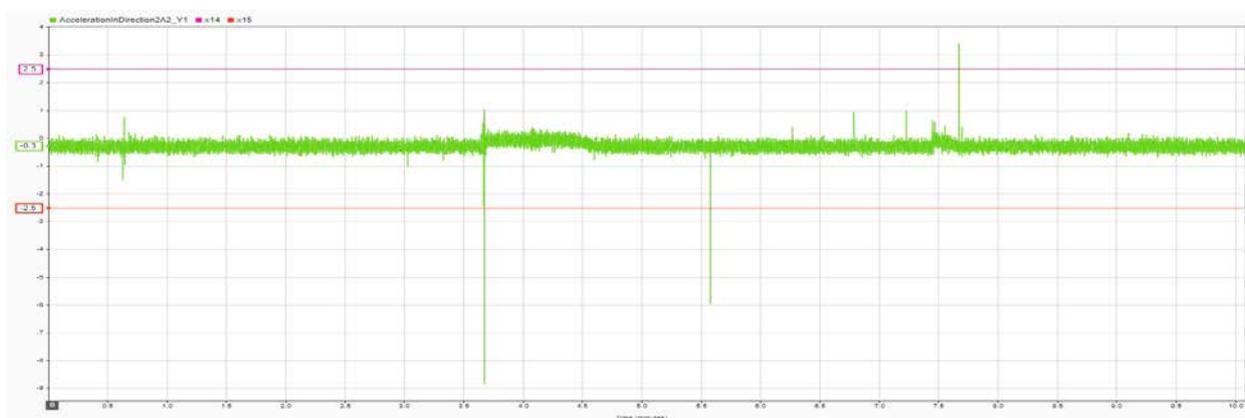


Рис. 6. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12

Аналогичным способом, используя теорию вероятности и математическую статистику, строится график функции плотности вероятности нормального распределения, представленный на рис. 7. Из графика видно, что функция заполнена

только в зоне околонулевого математического ожидания. Область положительных значений ускорений описывается одной точкой, область отрицательных значений — тремя точками в диапазоне от -2 до -9 м/с².

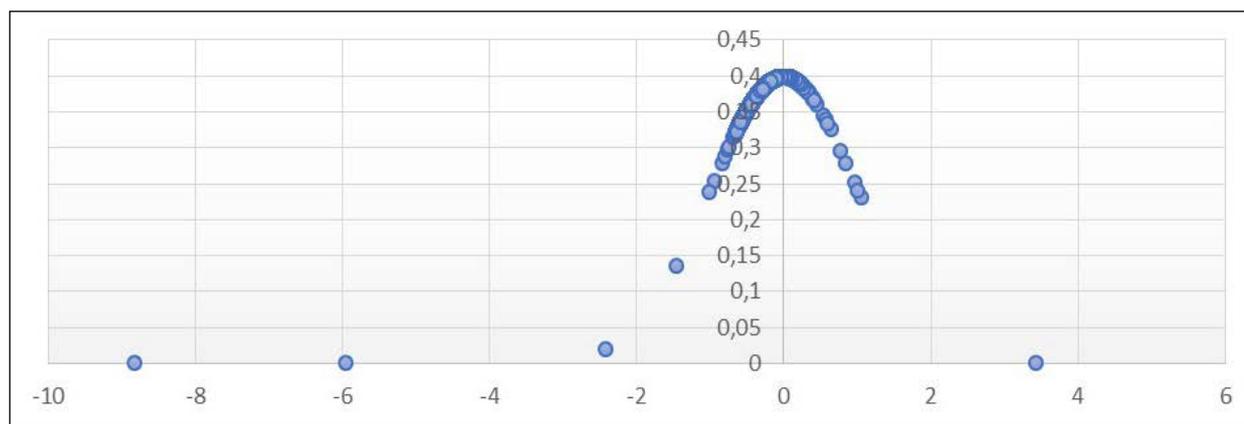


Рис. 7. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра

На II этапе структурного подхода необходимо проверить предположение о том, что случайные величины ускорений колебаний, полученные с акселерометров, распределяются по стандартному нормальному закону распределения. Распределением Гаусса принято считать закон распределения с математическим ожиданием, равным 0, и стандартным отклонением, равным 1. В данном научном исследовании авторы использовали два критерия согласия: тест Харке — Бера и критерий Колмогорова.

Принцип теста Харке — Бера заключается в сравнении асимметрии и эксцесса фактического распределения выборки из случайных величин со значениями асимметрии и эксцесса стандартного нормального распределения, равные

$$\bar{A} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{E} = 0. \quad (2)$$

Асимметрия показывает смещение кривой относительно 0 влево или вправо и определяется по формуле (3):

$$\hat{A} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^{3/2}}. \quad (3)$$

Эксцесс характеризует скорость распределения и определяется формулой (4):

$$\hat{E} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} - 3, \quad (4)$$

где x_i — i -й элемент выборки;

n — объем выборки;

\bar{x} — среднее арифметическое выборки.

При статистическом анализе закона распределения возникает неопределенность относительно допустимых отклонений между оценками асимметрии и эксцесса и их теоретическими значениями. Величины асимметрии и эксцесса, показанные в формулах (1) — (2), являются идеальными для стандартного нормального закона распределения, которые недостижимы из-за возникновения случайных ошибок распределения.

В соответствии с центральной предельной теоремой с увеличением числа одинаково распределенных и независимых слагаемых закон распределения их суммы стремится

к нормальному распределению. Случайные величины, используемые в формулах (3)—(4), независимы при условии, что среднее арифметическое случайных ошибок измерений незначительно отличается от нуля.

Из этого следует, что значения асимметрии и эксцесса при увеличении числа наблюдений стремятся к нормальному закону распределения, что позволяет определить пороговые отклонения фактических значений асимметрии и эксцесса выборки случайных величин ускорений по формулам (5) — (6):

$$|\hat{A}| < t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{A}}, \quad (5)$$

$$|\hat{E}| < t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{E}}, \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}_{\hat{A}}$ и $\bar{\sigma}_{\hat{E}}$ — среднеквадратические отклонения фактических коэффициентов асимметрии и эксцесса выборки случайных величин;

t — квантиль стандартного нормального распределения, равный 1,645, для уровня надежности 95 %.

Среднеквадратические отклонения фактических коэффициентов асимметрии и эксцесса рассчитываются по формулам (7) — (8):

$$\bar{\sigma}_{\hat{A}} = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}, \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_{\hat{E}} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (8)$$

Для подтверждения нулевой гипотезы по тесту Харке — Бера необходимо выполнение условий (2,5) — (2,6). При выполнении только одного условия нулевая гипотеза отвергается.

При срабатывании СММК акселерометр начинает записывать измерения с максимальной частотой дискретизации, равной ~50,4 Гц, в течение 600 сек. Из полученных данных с акселерометра следует, что объем выборки равен $n = 30250$. Тогда предельные отклонения для коэффициентов асимметрии и эксцесса равны

$$t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{A}} = 1,645 \cdot \sqrt{\frac{6(30250-1)}{(30250+1)(30250+3)}} = 0,023166, \quad (9)$$

$$t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{E}} = 1,645 \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot 30250(30250-2)(30250-3)}{(30250-1)^2(30250+3)(30250+5)}} = 0,046327. \quad (10)$$

Для проверки предположения по тесту Харке — Бера использовались выборки по 1-й группе, то есть величины ускорений при обоснованном срабатывании СММК. Результаты теста представлены в табл. 1.

По результатам видно, что в ряде выборов коэффициент асимметрии удовлетворяет неравенству (5), что показывает сим-

метричность графика функции плотности распределения относительно 0. Также из полученных результатов следует, что коэффициент эксцесса превышает предельные значения, полученные по формуле (10), что свидетельствует об островершинности кривой и наличии длинных хвостов, отличных от стандартного нормального распределения.

Как было описано выше, для подтверждения гипотезы по тесту Харке — Бера необходимо выполнение двух условий, из чего следует сделать вывод, что нулевая гипотеза отвергается, следовательно, случайные величи-

ны ускорений колебаний не распределены по стандартному нормальному закону распределения. Для того чтобы точно убедиться в этом, рассматривается второй критерий согласия — критерий Колмогорова.

ТАБЛИЦА 1. Результаты теста Харке — Бера и критерия Колмогорова

№ п/п	Наименование выборки	Асимметрия	Эксцесс	Критерий Колмогорова	ИТОГ
1	Выборка № 1	-0,02217	10,18146	0,130552	Гипотеза отвергается
2	Выборка № 2	0,044828	15,26659	0,149097	Гипотеза отвергается
3	Выборка № 3	-0,2926	19,60222	0,109623	Гипотеза отвергается
4	Выборка № 4	0,015769	7,30373	0,108198	Гипотеза отвергается
5	Выборка № 5	0,020037	5,659714	0,072229	Гипотеза отвергается
6	Выборка № 6	0,013192	3,899082	0,142633	Гипотеза отвергается

Критерий согласия Колмогорова рассматривается в случае проверки простых гипотез о принадлежности исследуемой выборки известному закону распределения, а именно стандартному нормальному закону распределения.

Статистика критерия определяется по выражению (11):

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|, \quad (11)$$

где \sup — точная верхняя граница функции $|F_n(x) - F(x)|$;

$F_n(x)$ — функция распределения исследуемой выборки;

$F(x)$ — функция стандартного нормального распределения.

Для подтверждения нулевой гипотезы о том, что выборка подчиняется стандартному нормальному закону распределения, необходимо выполнение условия (12):

$$D_n < D_{кр}, \quad (12)$$

где $D_{кр}$ — критическое число по критерию Колмогорова.

Данное число определяется по объему выборки n по формуле (13):

$$D_{кр} = \frac{1,36}{\sqrt{n}} = \frac{1,36}{\sqrt{30250}} = 0,007819. \quad (13)$$

При проверке по критерию Колмогорова использовались аналогичные выборки. Результаты проверки представлены в табл. 1. Полученные результаты также показывают, что нулевая гипотеза отвергается, из чего следует, что случайные величины ускорений колебаний пилонов не распределяются по стандартному нормальному закону распределения и предположение, сделанное выше, является неверным. В свою очередь, на графиках функции плотности вероятности распределения (рис. 3 и 5) отчетливо видно: кривая функции имеет колоколообразную форму и визуально выглядит симметричной относительно оси абсцисс. По тесту Харке — Бера также определяется коэффициент асимметрии, близкий к нулю. Такие заключения представляют возможность сделать предположение о том, что исследуемые случайные величины ускорений колебаний относятся к семейству нормальных

распределений с отличными от 0 и 1 значениями математического ожидания и стандартного отклонения соответственно.

Заключение

Авторами предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге, включающий три этапа: I этап — предварительный анализ, II этап — выборочный анализ, III этап — детальный анализ.

На II этапе проведена проверка нулевой гипотезы о распределении случайных величин ускорений колебаний пилона по стандартному нормальному закону распределения. По результатам проверки гипотеза была отклонена.

Авторами озвучено предположение, что случайные величины ускорений колебаний относятся к семейству нормальных распределений с отличными от стандартного нормального закона распределения значениями математического ожидания и стандартного отклонения.

Библиографический список

1. Махонько А. А., Мальков А. В., Белый А. А. и др. 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. EDN JEYBWL.
2. Махонько А. А., Мальков А. В., Белый А. А. и др. 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. EDN NUIUJE.
3. Лазарев Ю. Г., Ермошин Н. А., Сенцов И. В. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путевой Навигатор. 2019. № 38 (64). СПб.: АНП «Объединение «ДОРМОСТ», 2019. С. 24–31.
4. Белый А. А., Белов А. А., Ященко А. И. и др. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. 2020. № 45 (71). С. 38–45. EDN ZDBIAB.
5. Яшнов А. Н., Баранов Т. М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 199–209.
6. Карапетов Э. С., Белый А. А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век» 2008. № 4 (29). СПб.: Зодчий, 2008. С. 80–83.
7. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. // Procedia Engineering. 2017. № 188. P. 340–347.
8. Yang Y., Q. S. Li, B. W. Yan. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016. Article ID 7494817. P 14. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
10. Lienhart W., Ehrhart M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation // Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring. 2015. DOI: 10.12783/SHM2015/58.
11. Li J, Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. Mech Syst Signal Pr. 2015. 60–61: 124–150.

12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO. Berlin: 2006. P. 63.

13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. S. Sumitro / In: Ansari F. (eds) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.

Дата поступления: 26.04.2024

Решение о публикации: 26.05.2024

Контактная информация:

МАХОНЬКО Андрей Андреевич —
начальник отдела

дорожного надзора;
andrey.makhonko@nch-spb.ru

ЛАЗАРЕВ Юрий Георгиевич —
докт. техн. наук, профессор;
lazarev_yug@spbstu.ru

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич —
инженер;

aaa.12.03.1992@mail.ru

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. Part 1

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

¹ Highway Operator Nord, LLC, 3A, lit. A, per. Volynsky, Saint Petersburg, 191186, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, lit. B, Polytechnicheskaya str., Saint Petersburg, 195251, Russia

³ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Makhonko A. A., Lazarev Y. G., Antonyuk A. A. 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, vol. 21, iss. 2, pp. 421–431. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431

Abstract

Purpose: assessing the performance of the monitoring system for engineering structures and assessing the current state of the structures of the cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in the city of St. Petersburg due to the occurrence of emergency situations in which accelerometers on the pylons record values exceeding the limit. **Methods:** statistical data from the databases of the existing system of monitoring engineering structures is used to obtain the results. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying the theoretical methods of scientific knowledge: the analytical method, the mathematical statistics theory, induction. **Results:** the resulting structural approach to assessing the performance of the monitoring system for engineering structures on cable-stayed bridges makes it possible to reduce the number of false alarms of the system and assess the current state of the bridge structure. Within the framework of the III stage of the structural approach, it is proposed to develop a methodology for assessing the performance of the monitoring system for engineering structures with subsequent assessment of the current state of cable-stayed bridge structures. **Practical significance:** the results of the work are important for construction as they expand the understanding of the features of the mechanism of soil freezing.

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

References

1. Mahon'ko A. A., Mal'kov A. V., Belyj A. A. i dr. Osobennosti sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v Sankt-Peterburge // *Putevoj navigator*. 2023. № 56 (82). S. 68–77. EDN JEYBWL. (In Russian)
2. Mahon'ko A. A., Mal'kov A. V., Belyj A. A. i dr. Opyt jekspluatacii sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v Sankt-Peterburge // *Innovacionnye transportnye sistemy i tehnologii*. 2023. T. 9, № 2. S. 83–96. DOI: 10.17816/trans-syst20239283-96. EDN NUIUJE. (In Russian)
3. Lazarev Ju. G., Ermoshin N. A., Sencov I. V. Planirovanie razvitija dorozhnoj seti s uchetom principov mnogokriterial'noj optimizacii // *Putevoj Navigator*. 2019. № 38 (64). SPb.: ANP «Ob#edinenie «DOR-MOST», 2019. S. 24–31. (In Russian)
4. Belyj A. A., Belov A. A., Jashhenko A. I. i dr. Integral'nyj monitoring mosta Aleksandra Nevskogo // *Putevoj navigator*. 2020. № 45 (71). S. 38–45. EDN ZD-BIAB. (In Russian)
5. Jashnov A. N., Baranov T. M. Nekotorye rezul'taty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez r. Angaru v Irkutske // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. № 1 (60). S. 199–209. (In Russian)
6. Karapetov Je. S., Belyj A. A. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy // *Vestnik «Zodchij. 21 vek»* 2008. № 4 (29). SPb.: Zodchij, 2008. S. 80–83. (In Russian)
7. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. // *Procedia Engineering*. 2017. № 188. P. 340–347.
8. Yang Y., Q. S. Li, B. W. Yan. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // *Journal of Sensors*. 2016. Vol. 2016. Article ID 7494817. P 14. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
10. Lienhart W., Ehrhart M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation // *Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring*. 2015. DOI: 10.12783/SHM2015/58.
11. Li J, Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. *Mech Syst Signal Pr*. 2015. 60–61: 124–150.
12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO. Berlin: 2006. P. 63.
13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. S. Sumitro / In: Ansari F. (eds) *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*. Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.

Received: 26.04.2024

Accepted: 26.05.2024

Author's information:

Andrey A. MAKHONKO — head of construction supervision department; andrey.makhonko@nch-spb.ru

Yurij G. LAZAREV — PhD in Engineering, Professor; lazarev_yug@spbstu.ru

Anatoly A. ANTONYUK — Engineer; aaa.12.03.1992@mail.ru