

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 городе Санкт-Петербурге. Часть 2**

**А. А. Махонько<sup>1</sup>, Ю. Г. Лазарев<sup>2</sup>, А. А. Антонюк<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Оператор скоростных автомагистралей – Север», Россия, 191186, пер. Волынский, 3а, литера А

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

<sup>3</sup> 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 городе Санкт-Петербурге. Часть 2 // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 585–597. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-585-597

### **Аннотация**

**Цель:** оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и оценка текущего состояния конструкций вантового моста 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. **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: аналитического метода, теории математической статистики, индукции. **Результаты:** предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и текущего состояния конструкций вантового моста, по полученным данным с акселерометров, включающий три этапа: I этап — предварительный анализ; II этап — выборочный анализ; III этап — 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 предлагается 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) 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.

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 снижения риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде конструкций [1–8].

Основным показателем работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций является надежность системы, 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, а именно состояниям эксплуатируемого объекта, характеризующимся 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 [9–13].

В данной статье продолжается научное исследование вопроса структурного подхода к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций, который был озвучен в первой части настоящей статьи.

## Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций

Для проверки гипотезы о том, что исследуемые случайные величины ускорений колебаний относятся к семейству нормальных распределений, необходимо подобрать нормальное распределение таким образом, чтобы оно было максимально приближено к эмпирическому распределению случайных величин ускорений колебаний. Для решения поставленной задачи коллектив авторов предлагает использовать коэффициент детерминации, который вычисляется по формуле (1):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (1)$$

где  $SS_{res}$  — сумма квадратов отклонений, рассчитанная по формуле (2);

$SS_{tot}$  — общая сумма квадратов случайной величины, рассчитанная по формуле (3).

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (2)$$

$$SS_{tot} = n\hat{\sigma}_x^2 \tag{3}$$

где  $x_j, \hat{x}_i$  — эмпирические и расчетные (теоретические) значения объясняемой переменной;

$\hat{\sigma}_x^2$  — дисперсия случайной величины.

Коэффициент детерминации, также известный как  $R^2$ , представляет собой статистическую меру согласия, используемую в регрессионном анализе, чтобы определить, насколько хорошо регрессионная модель аппроксимирует реальные точки данных. Он дает представление о доле дисперсии зависимой переменной, которую можно предсказать на основе независимых переменных. Значения коэффициента детерминации варьируются от 0 до 1, причем более высокие значения указывают на лучшее соответствие модели.

Основной характеристикой закона нормального распределения является математическое ожидание и стандартное отклонение, которые определяются по формулам (4) и (5) соответственно:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^k n_j \cdot \bar{x}_j \tag{4}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^k n_j \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})^2}, \tag{5}$$

где  $n_j$  — частота варианты;

$n$  — объем выборки.

Таким образом, необходимо подобрать значение математического ожидания и стандартного отклонения нормального (теоретического) распределения, чтобы коэффициент детерминации стремился к 1, а сумма квадратов отклонений близилась к 0.

Для проверки гипотезы были рассчитаны коэффициент детерминации и сумма квадратов отклонения для произвольных выборок случайных величин ускорений колебаний пилонов, полученных при срабатывании СММК.

В табл. 1 показаны несколько выборок с вычисленными значениями математических ожиданий, стандартных отклонений, коэффициента детерминации и суммой квадратов отклонений.

На рис. 1–12 показаны графики эмпирической и теоретической функции нормального распределения и их плотности вероятности.

ТАБЛИЦА 1. Результаты анализа выборок

№ п/п	Наименование выборки	$\bar{x}_{эмп}$	$\sigma_{эмп}$	$\bar{x}_{теор}$	$\sigma_{теор}$	$SS_{res}$	$R^2$	Группа
1	Выборка №1-R	-0,127	0,7299	1E-06	0,5861	0,3058	0,992088	1
2	Выборка №2-R	0,1106	0,5279	0,0679	0,3798	0,0696	0,998110	1
3	Выборка №3-R	-0,1169	0,2338	1E-06	0,2566	0,8924	0,977549	2
4	Выборка №4-R	0,1118	0,1685	0,0828	0,1351	0,0026	0,999934	2
5	Выборка №5-R	-0,3148	0,11501	1E-06	0,6388	2,8938	0,673582	3
6	Выборка №6-R	-0,2974	0,1244	1E-06	0,3997	5,9006	0,562387	3

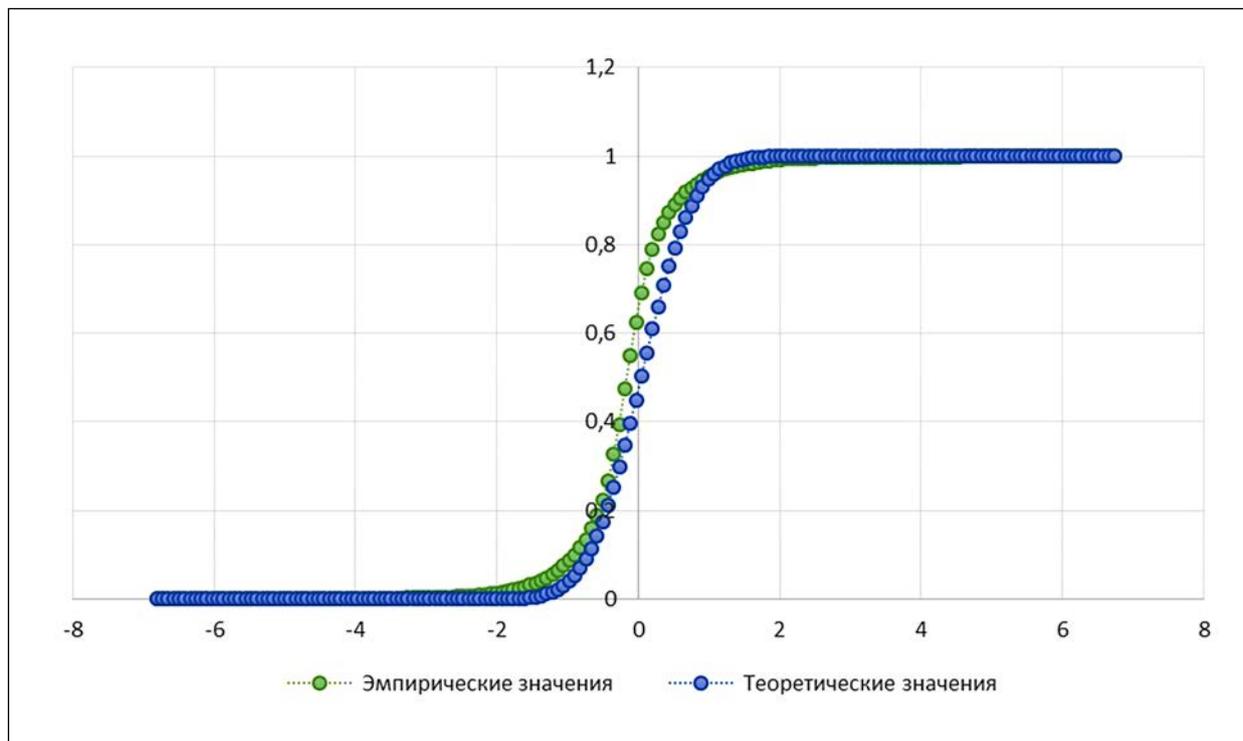


Рис. 1. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №1-R

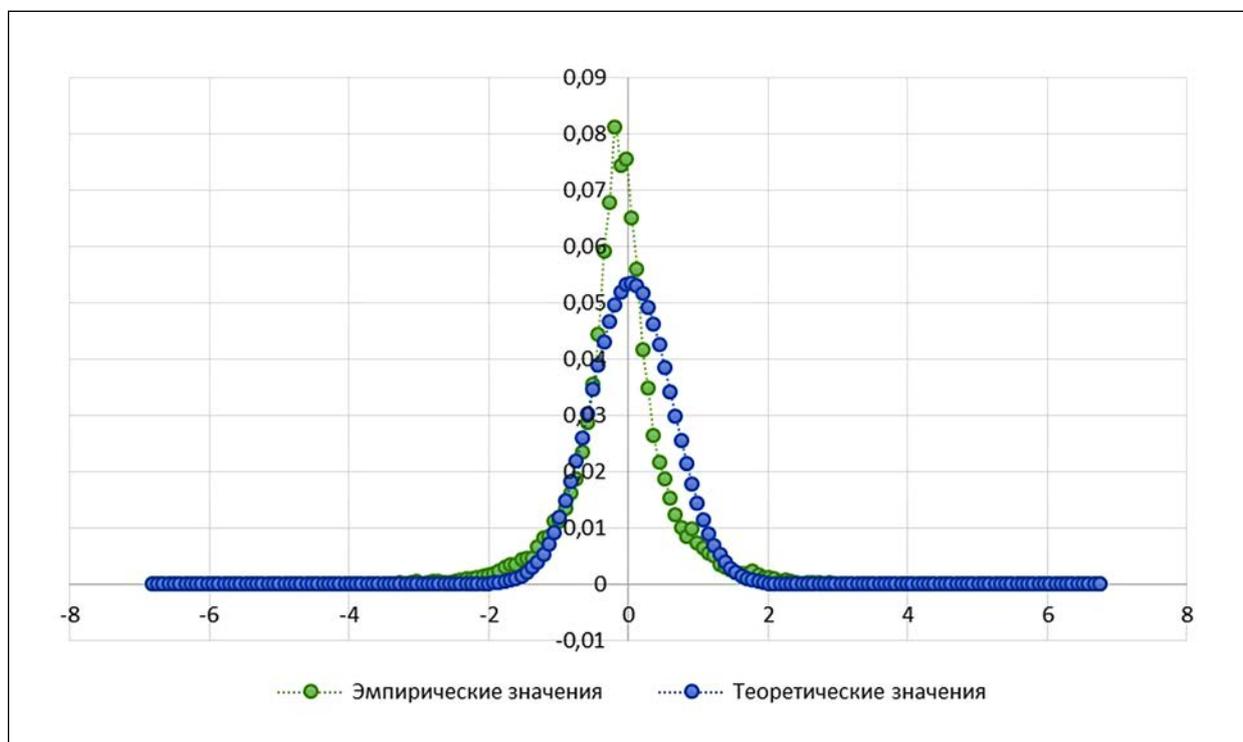


Рис. 2. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №1-R

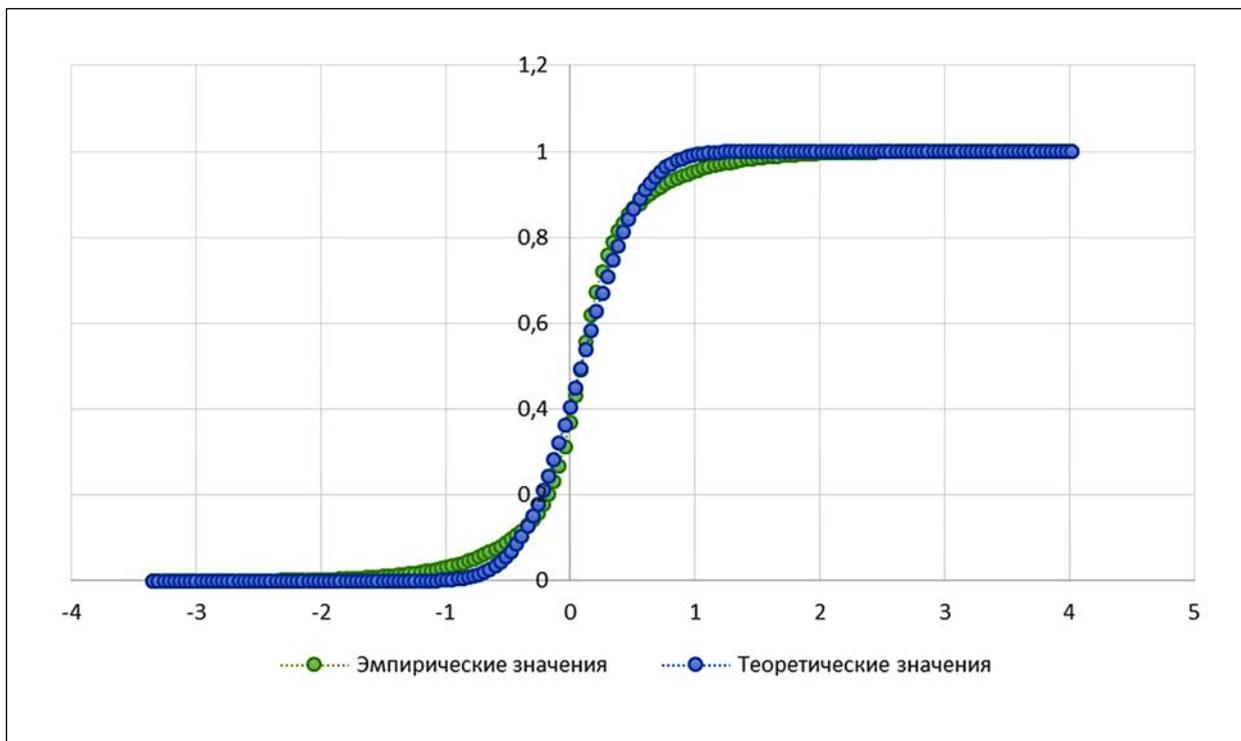


Рис. 3. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (каммулята) выборки №2-R

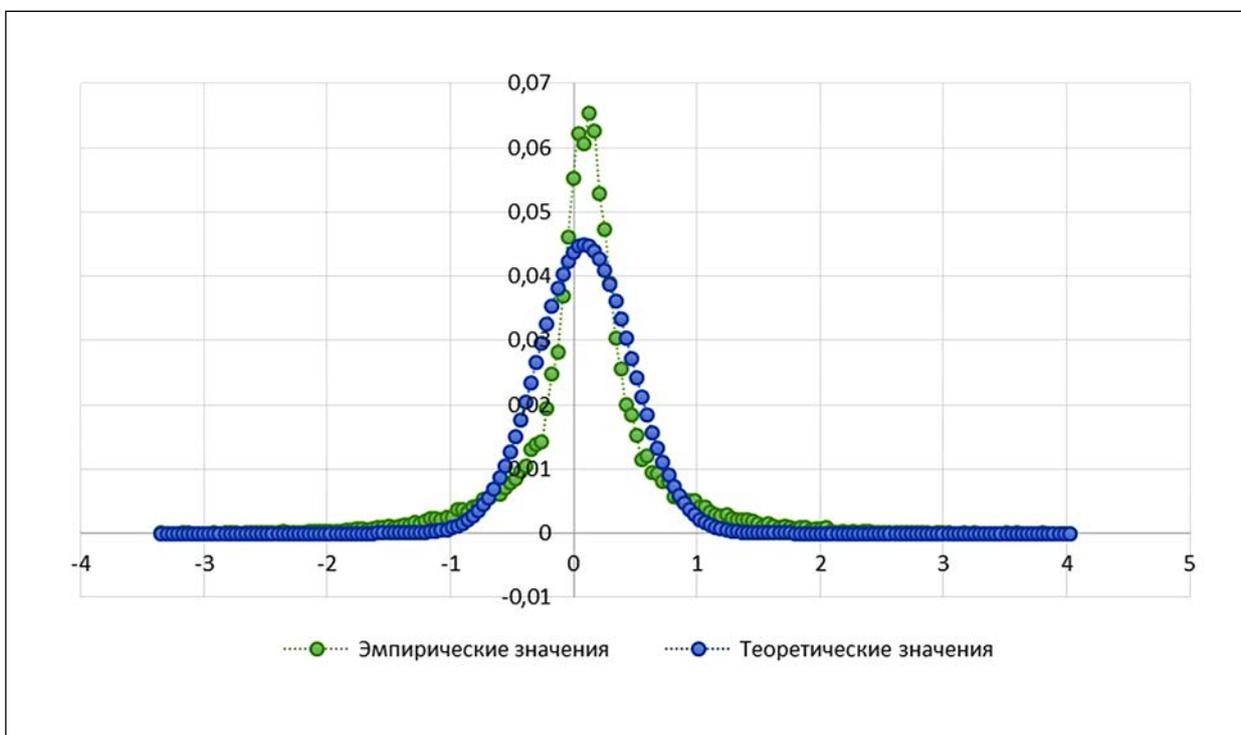


Рис. 4. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №2-R

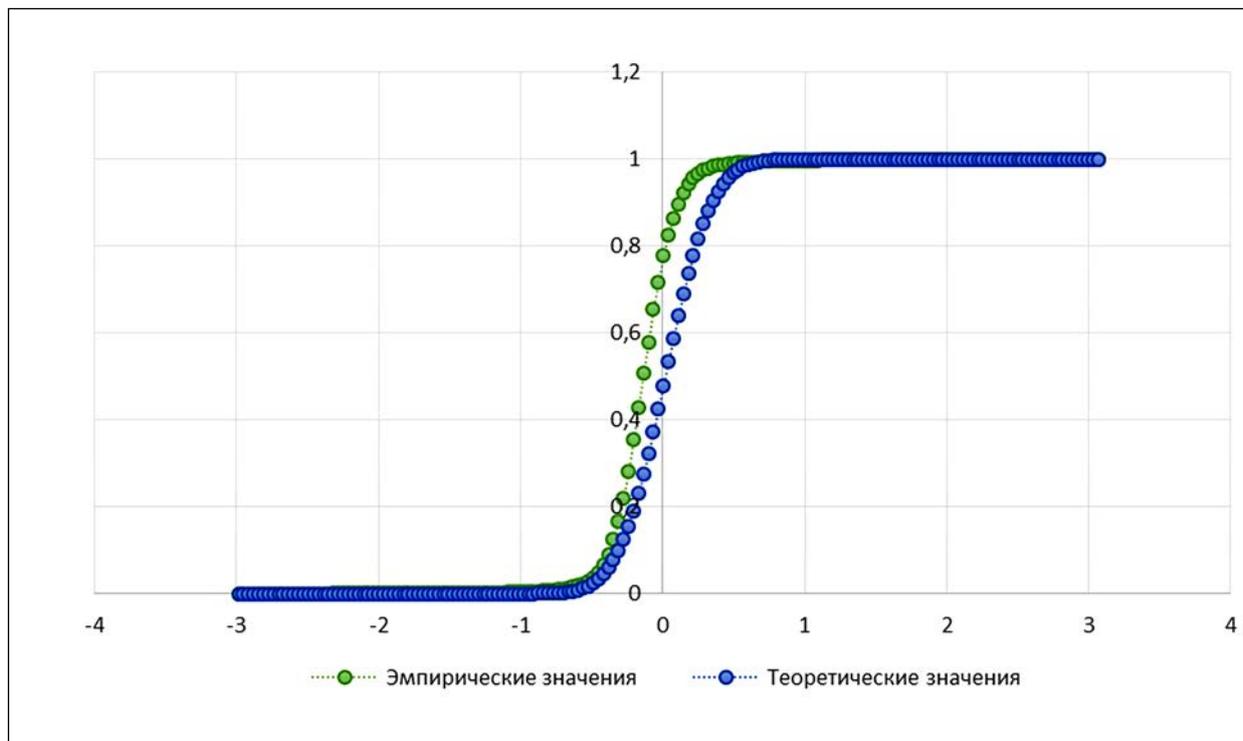


Рис. 5. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №3-R

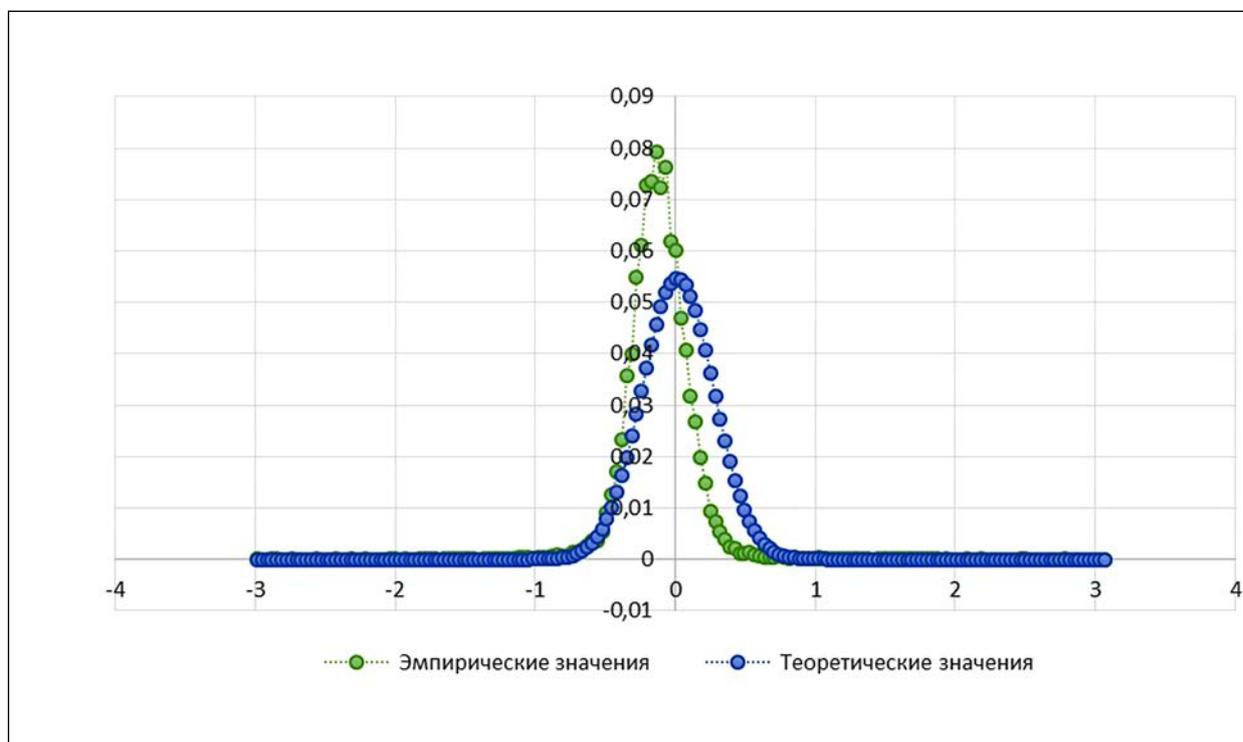


Рис. 6. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №3-R

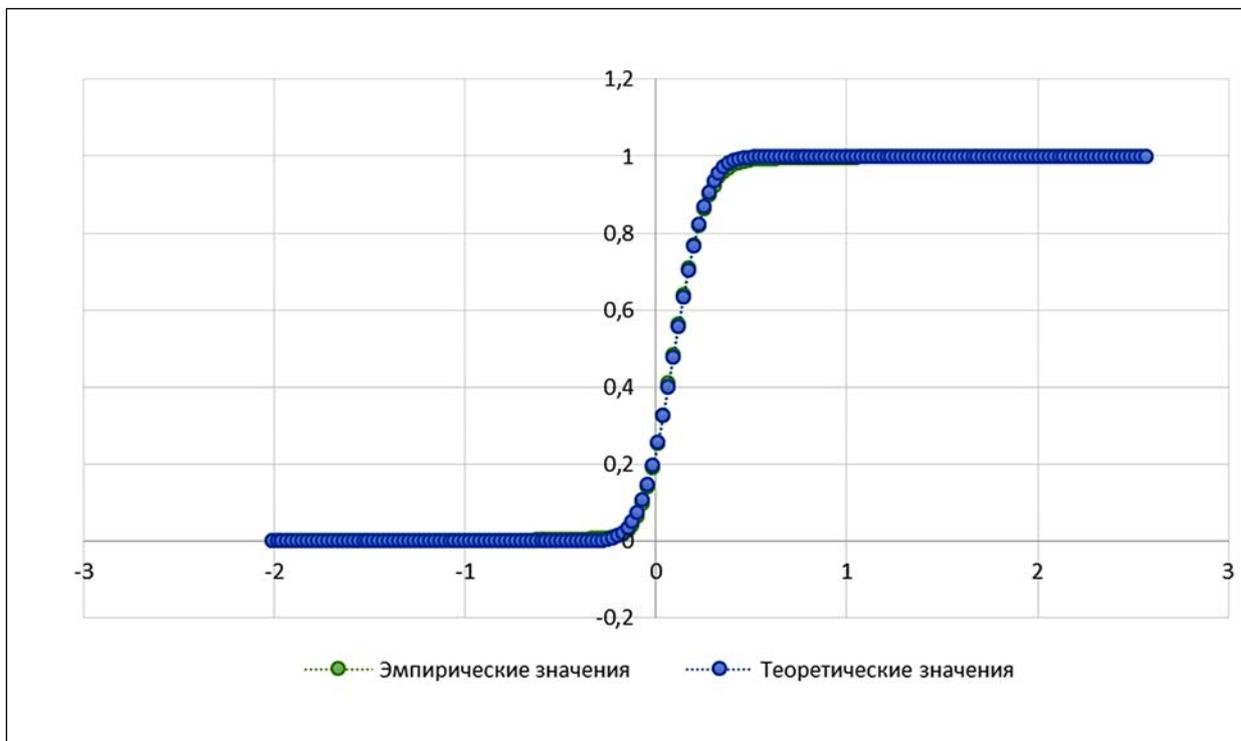


Рис. 7. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (каммулята) выборки №4-R

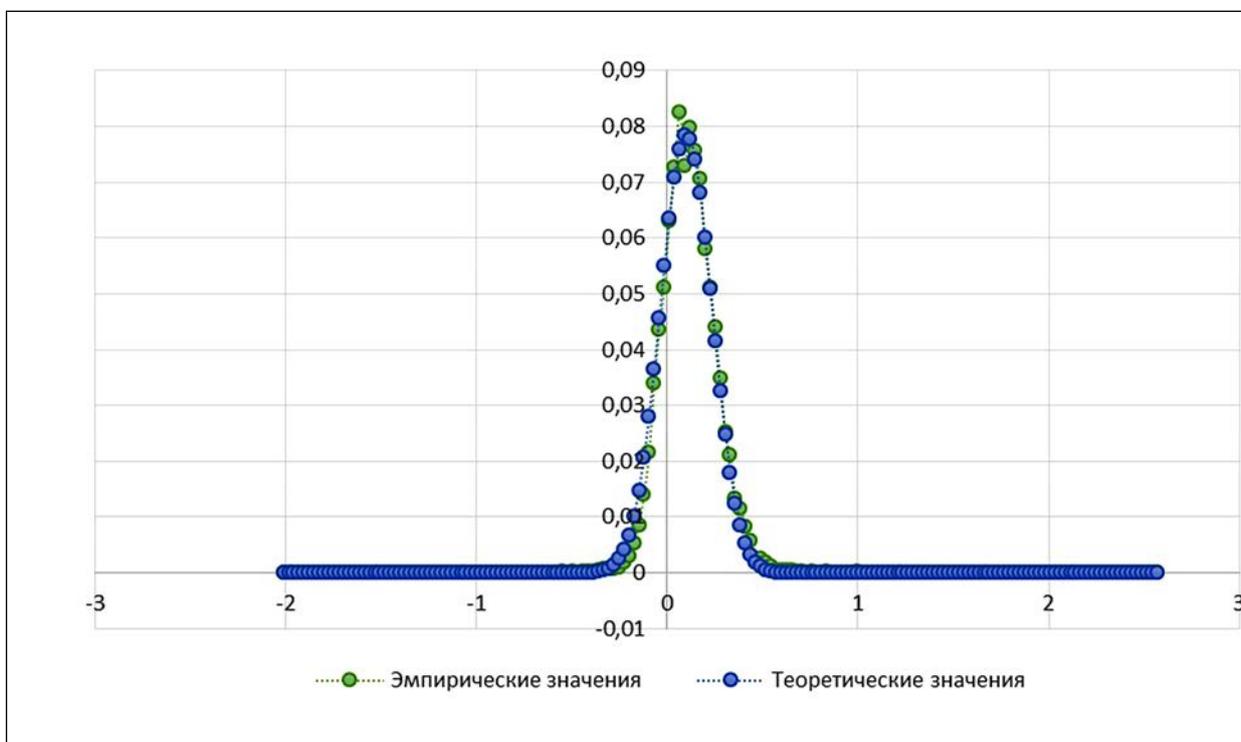


Рис. 8. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №4-R

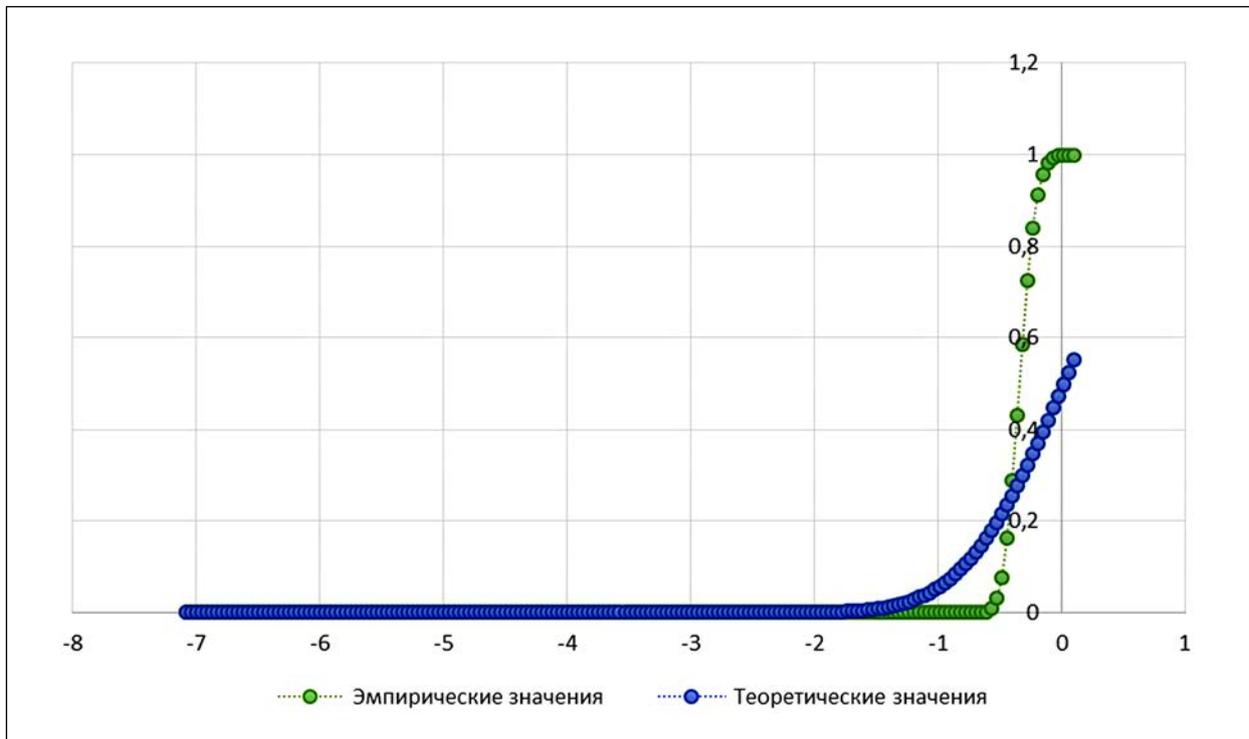


Рис. 9. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №5-R

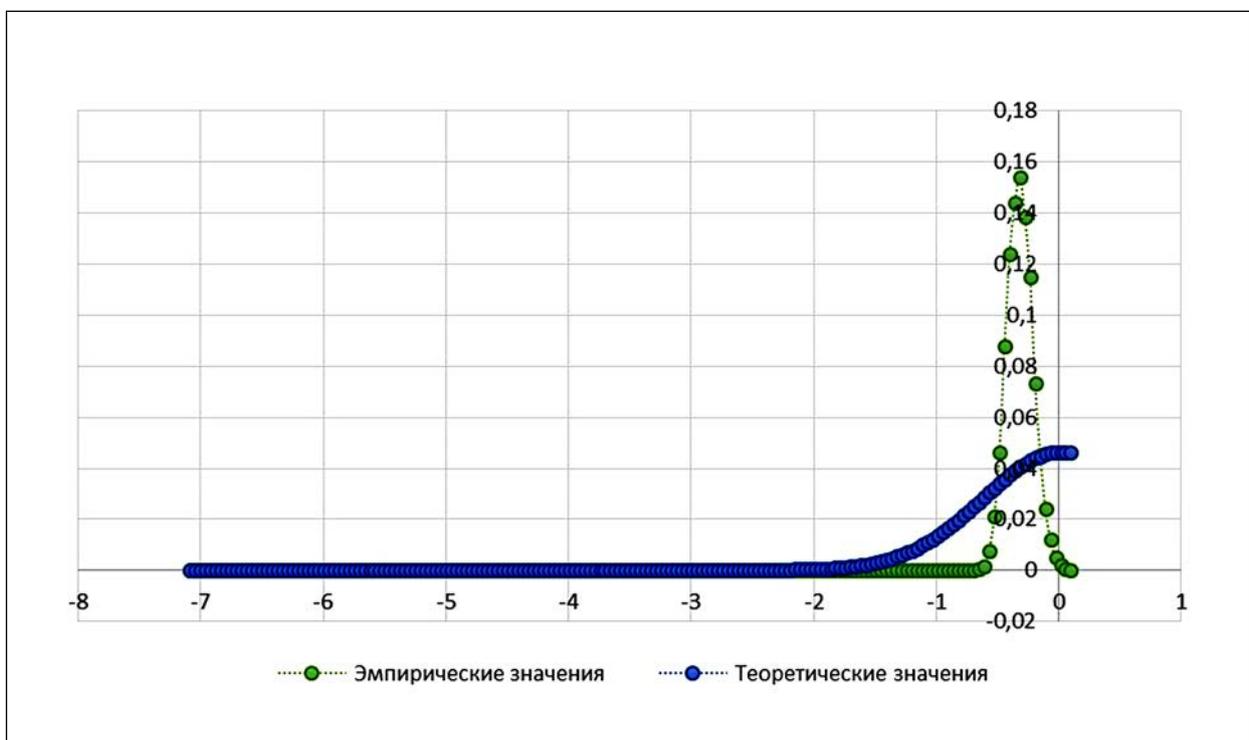


Рис. 10. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №5-R

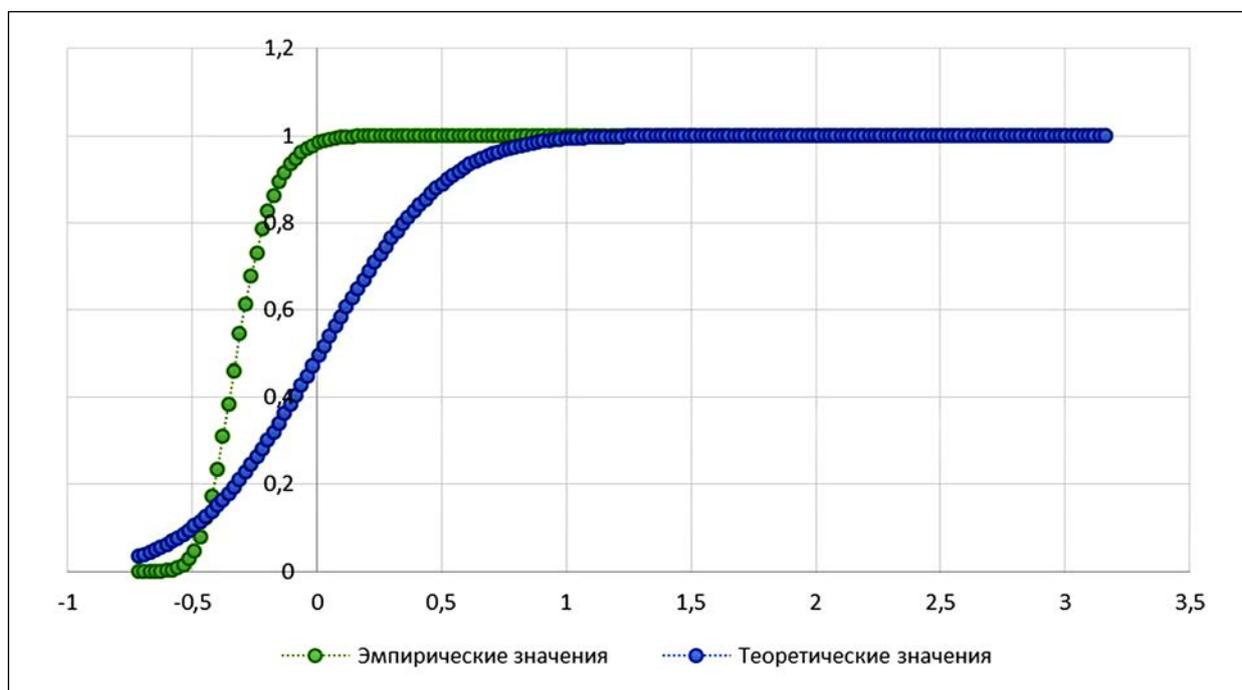


Рис. 11. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №6-R

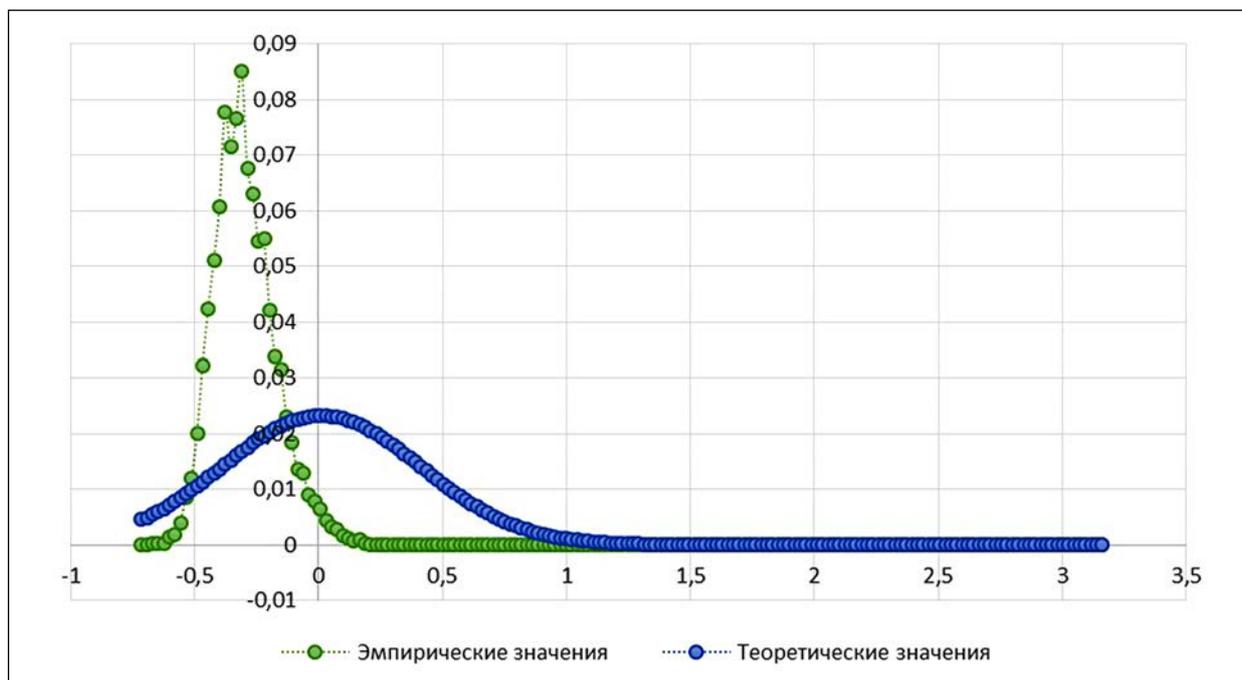


Рис. 12. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №6-R

Из анализа полученных результатов следует, что случайные величины ускорений колебаний распределены в большинстве случаев по

нормальному закону распределения с различными значениями математического ожидания и стандартного отклонения. Также из анализа

видно, что присутствуют выборки, где коэффициент детерминации значительно меньше, чем в других выборках, а сумма квадратов отклонений намного больше.

Из вышесказанного можно сделать строгий вывод, что предположение, сделанное на этапе предварительного анализа данных о делении нештатных ситуаций на 2 группы, верно, но частично, так как более корректно распределить все срабатывания системы мониторинга инженерных конструкций на 3 группы.

В 1-ю группу вошли те нештатные ситуации, когда срабатывание СМИК обоснованно и вызвано динамическим откликом конструкции. При этом коэффициент детерминации стремится к 1, что показывает практическую сходимость с теоретической регрессионной моделью нормального закона распределения. График функции плотности нормального распределения получается более пологим с менее длинными хвостами, что характеризуется показателем стандартного отклонения, который по сравнению с другими группами получается ближе к значению, равному 1. Предлагается ситуации, вошедшие в 1-ю группу, называть откликами.

К 2-й группе относятся нештатные ситуации, вызванные единичными, сильно локализованными экстремумами, значения которых превосходят предельные. В данном случае график функции плотности вероятности нормального распределения получается островершинным с длинными хвостами, что указывает на маленькое значение стандартного отклонения, которое, в свою очередь, показывает небольшой разброс случайных величин относительно среднего значения. При этом коэффициент детерминации также стремится к 1. Авторами предлагается для удобства терминологии называть такие нештатные ситуации выбросами.

В 3-ю группу распределены случаи, когда срабатывание СМИК необоснованно и вызвано

сбоями или ошибками оборудования, что показывают значения коэффициента детерминации и суммы квадратов отклонений. Коэффициент детерминации может получиться значительно меньше 1, а сумма квадратов отклонений — в разы больше 1, что показывает совершенную несходимость эмпирического закона распределения с нормальным. Также стоит отметить, что и визуально каммулята и функция плотности вероятности на графиках значительно отличаются от графиков нормального распределения. Предлагается называть такие нештатные ситуации сбоями.

Для перехода на III этап структурного подхода необходимо проанализировать все нештатные ситуации за весь период эксплуатации вантового моста через Петровский канал. Также необходимо разработать методику оценки работоспособности системы мониторинга.

Выборочный анализ нештатных ситуаций во время эксплуатации системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал показал, что присутствует корреляция между срабатыванием системы и полученными характеристиками нормального закона распределения: стандартным отклонением, общей суммой квадратов отклонений и коэффициентом детерминации. Данные выводы дают возможность уменьшить количество ложных срабатываний СМИК с последующей оценкой текущего состояния мостового сооружения. Однако для этого необходимо проанализировать все случаи нештатных ситуаций за весь период эксплуатации мостового сооружения.

### **Заключение**

1. Авторами предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе

автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге, включающий три этапа: I этап — предварительный анализ; II этап — выборочный анализ; III этап — детальный анализ.

2. 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.

3. Авторами было предложено использовать коэффициент детерминации и сумму квадратов отклонений для подбора нормального закона распределения. По результатам сделан строгий вывод, что в большей степени случайные величины ускорений колебаний распределены по нормальному закону распределения, а все нештатные ситуации можно распределить на 3 группы: отклик, выброс, сбой.

4. Для перехода на III этап необходимо удостовериться в полученных выводах и проанализировать все нештатные ситуации за весь период эксплуатации вантового моста.

5. Полученные выводы дают возможность уменьшить количество ложных срабатываний и оценить текущее состояние вантового моста. Для этого авторами разработана методика оценки работоспособности СММК.

### Библиографический список

1. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько [и др.] // Путьевой навигатор. 2023. № 56 (82). С. 68–77. EDN JEYBWL.
2. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько [и др.] // 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 // Путьевой навигатор. 2019. № 38 (64). С. 24–31.
4. Интегральный мониторинг моста Александра Невского / А. А. Белый [и др.] // Путьевой 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 реку 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. XXI век». 2008. № 4 (29). 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., Li Q. S., Yan B. W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Advances in Mechanical Engineering, 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop, Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors Volume 2016 (2016). Article ID 7494817. P. 14. URL: <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 (IWSHM), 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. P. 60–61, 124–150.

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

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

Дата поступления: 01.06.2024

Решение о публикации: 29.07.2024

**Контактная информация:**

МАХОНЬКО Андрей Андреевич — начальник отдела дорожного надзора; [andrey.makhonko@nch-spb.ru](mailto:andrey.makhonko@nch-spb.ru)

ЛАЗАРЕВ Юрий Георгиевич — докт. техн. наук, профессор; [lazarev\\_yug@spbstu.ru](mailto:lazarev_yug@spbstu.ru)

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич — инженер; [aaa.12.03.1992@mail.ru](mailto: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 2

A. A. Makhonko<sup>1</sup>, Y. G. Lazarev<sup>2</sup>, A. A. Antonyuk<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, lit. B, Saint Petersburg, 195251, Russia

<sup>3</sup> 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. Part 2 // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 585–597. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-585-597*

### 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. Osobennosti sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi "Zapadnyj skorostnoj diametr" v Sankt-Peterburge / A. A. Mahon'ko [i dr.] // Putevoj navigator. 2023. № 56 (82). S. 68–77. EDN JEYBWL. (In Russian)
2. Opyt ekspluatatsii sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi "Zapadnyj skorostnoj diametr" v Sankt-Peterburge / A. A. Mahon'ko [i dr.] // Innovacionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2023. T. 9, № 2. S. 83–96. DOI: 10.17816/transsyst20239283-96. EDN NUIUJE. (In Russian)
3. Lazarev Yu. G., Ermoshin N. A., Sencov I. V. Planirovanie razvitiya dorozhnoj seti s uchetom principov mnogokriterial'noj optimizatsii // Putevoj navigator. 2019. № 38 (64). S. 24–31. (In Russian)
4. Integral'nyj monitoring mosta Aleksandra Nevskogo / A. A. Belyj [i dr.] // Putevoj navigator. 2020. № 45 (71). S. 38–45. EDN ZDBIAB. (In Russian)
5. Yashnov A. N., Baranov T. M. Nekotorye rezul'taty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez reku Angaru v Irkutske // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. № 1 (60). S. 199–209. (In Russian)
6. Karapetov E. S., Belyj A. A. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istoriya. Naznachenie. Primery. Perspektivy // Vestnik "Zodchij. XXI vek". 2008. № 4 (29). 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., Li Q. S., Yan B. W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Advances in Mechanical Engineering, 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop, Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors Volume 2016 (2016). Article ID 7494817. P. 14. URL: <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 (IWSHM), 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. P. 60–61, 124–150.
12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO, Berlin, 2006. 63 p.
13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. In: Ansari F. (eds) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring // Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. URL: [https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2\\_49](https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49).

Received: 01.06.2024

Accepted: 29.07.2024

### Author's information:

Andrey A. MAKHONKO — Head of construction supervision department; [andrey.makhonko@nch-spb.ru](mailto:andrey.makhonko@nch-spb.ru)

Yurij G. LAZAREV — PhD in Engineering, Professor; [lazarev\\_yug@spbstu.ru](mailto:lazarev_yug@spbstu.ru)

Anatoly A. ANTONYUK — Engineer; [aaa.12.03.1992@mail.ru](mailto:aaa.12.03.1992@mail.ru)