

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

УДК [UDC] 624.21

DOI 10.17816/transsyst20239283-96

© А.А. Махонько¹, А.В. Мальков¹, А.А. Белый², А.А. Антонюк³

¹ООО «ОСА-Север»

²Военная академия материально-технического обеспечения
имени генерала армии А.В. Хрулева

³Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВАНТОВОГО МОСТА ЧЕРЕЗ ПЕТРОВСКИЙ КАНАЛ В СТВОРЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «ЗАПАДНЫЙ СКОРОСТНОЙ ДИАМЕТР» В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Цель: Анализ действующей системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» (ЗСД) в городе Санкт-Петербурге.

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 действующей системы мониторинга инженерных конструкций с описанием одной из основных проблем – невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки напряженно-деформированного состояния мостового сооружения в целом. Предложены пути решения сформированной проблемы, определена перспектива дальнейших исследований в части несовершенства систем мониторинга на внеклассных сооружениях.

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.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

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

© A.A. Makhonko¹, A.V. Malkov¹, A.A. Belyi², A.A. Antonyuk³

¹Highway Operator Nord, LLC

²Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov

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

EXPERIENCE OF OPERATION MONITORING SYSTEM OF THE CAT-BONE BRIDGE THROUGH THE PETROVSKAYA CHANNEL IN THE ALIGNMENT OF THE WESTERN SPEED DIAMETER HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

Aim: Analysis of the current monitoring system of the engineering structures of a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg.

Methods and Materials: 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: Analysis of the current monitoring system of engineering structures is presented with a description of one of the main problems – the impossibility of synchronizing readings from all sensors during considered period of time, which leads to the inability to correctly assess the stress-strain state of the bridge structure as a whole. Discovered problem solutions are proposed, further research prospect is determined in part of the imperfection of monitoring systems for long-span facilities.

Conclusion: The obtained study results can be used in designing 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 assessing technical condition of structures assessment.

Key words: structural artificial monitoring; technical condition management; transport infrastructure object; cable-stayed bridge; stressed-deformed condition.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях использование систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) является важным компонентом жизненного цикла внеклассных мостовых сооружений.

Применение СМИК является обязательным для обеспечения требуемого уровня безопасности в рамках действующей нормативной базы, в том числе для снижения риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде [1–3].

Система мониторинга инженерных конструкций 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 [4–6].

К основным задачам систем мониторинга необходимо отнести:

1. Оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и всего сооружения с учетом имеющихся дефектов и повреждений [7, 8];
2. Анализ и оценка степени влияния внешних воздействий на несущую способность в рассматриваемый момент времени и на прогнозируемый период;
3. Прогнозирование долговечности сооружения с учетом внешних воздействий и происходящих процессах деградации;
4. Разработка стратегий по восстановлению или улучшению потребительских свойств на действующих или проектируемых сооружениях [9, 10].

При использовании действующей системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в Санкт-Петербурге авторами были выделены несколько проблем, влияющие на качество оценки технического состояния мостового сооружения.

В данной статье авторами будет рассмотрена одна из основных проблем в действующей системе мониторинга – невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки напряженно-деформированного состояния мостового сооружения в целом.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Согласно ГОСТ Р 59943-2021 в качестве объектов мониторинга необходимо рассматривать мостовые сооружения, имеющие длину одного из пролетов более 100 м или высотой опор более 15 м. В связи с этим устройство СМИК рассматриваемого моста является обязательным условием при эксплуатации сооружения [11, 12].

При мониторинге конструкций вантового моста предусматривается определение необходимых параметров для анализа напряженно-деформированного состояния различных элементов сооружения. Мониторингу подлежат элементы моста, подверженные наибольшим нагрузкам и изменениям состояния в процессе эксплуатации: опоры, пилоны, вантовая система, пролетное строение [13].

Основными параметрами, которые определяются в процессе мониторинга являются: абсолютные и относительные смещения конструкций; динамические показатели, влияющие на износ конструкций; натяжение вантовой системы; напряженно-деформированное состояние пролетного строения [14, 15].

На Рис. 1 представлена схема расположения датчиков СМИК на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в городе Санкт-Петербурге.

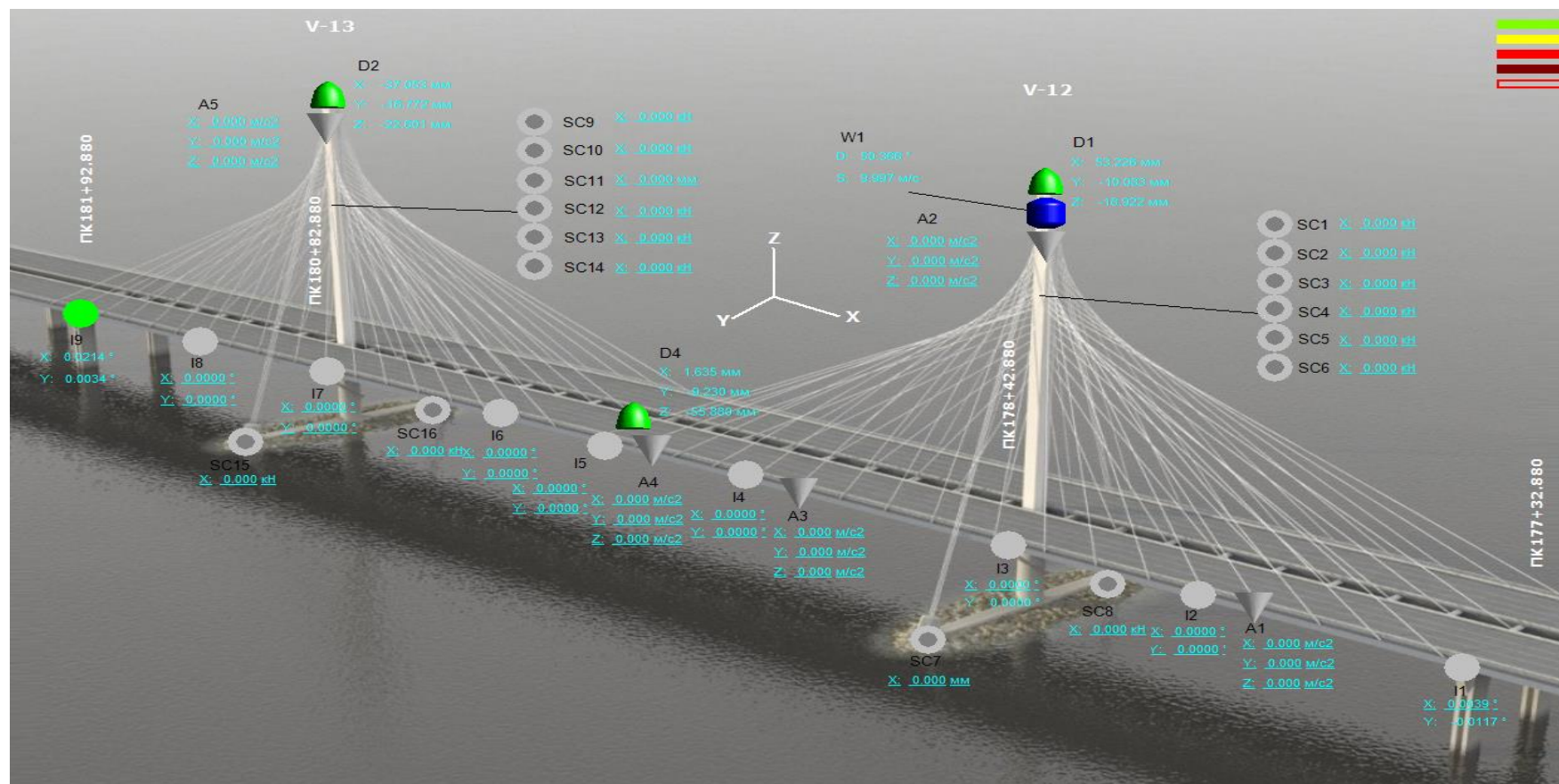


Рис. 1. Схема расположения датчиков системы мониторинга инженерных конструкций

Установленную систему мониторинга инженерных конструкций можно разделить на подсистемы, которые представлены на Рис. 2.

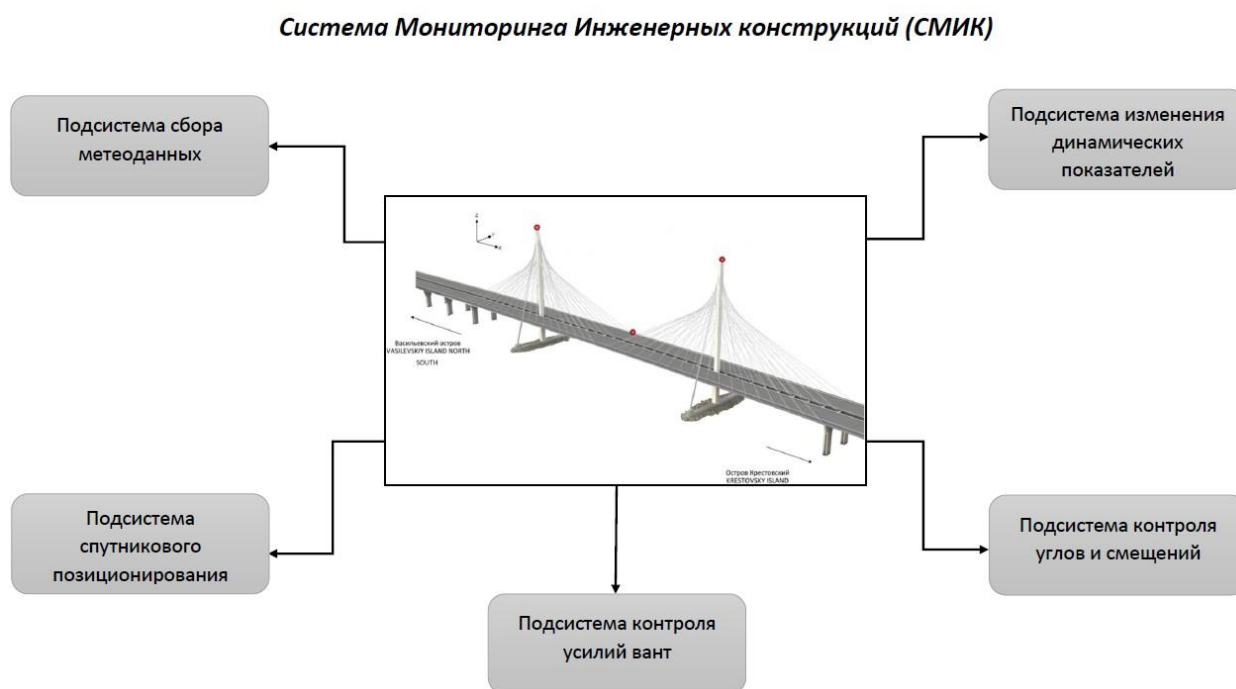


Рис. 2. Схема системы мониторинга инженерных конструкций

В каждой подсистеме находится элемент мостового сооружения, на который устанавливается датчик или группа датчиков. В Табл. 1 представлены зоны контроля и количество установленных датчиков, распределенных по подсистемам СМИК.

Таблица 1. Зоны контроля, подсистемы и количество датчиков

№ п/п	Наименование подсистемы СМИК	Элементы моста, подлежащие мониторингу	Датчики, установленные на элементы моста
1.	Подсистема контроля усилия вант	Вантовая система	Датчик усилия вант (16 шт)
2.	Подсистема изменения динамических показателей	Пилоны; Пролетные строения	Акселерометр (5 шт)
3.	Подсистема контроля углов и смещений	Промежуточные опоры; пролетные строения	Инclinометр (9 шт)
4.	Подсистема спутникового позиционирования	Пилоны; пролетное строение	GPS-станция (3 шт)
5.	Подсистема сбора метеоданных	Пилон	Анеморумбометр (1 шт)

Далее приведем принцип работы каждой подсистемы с описанием датчиков, входящих в нее.

В подсистеме контроля усилия вант используются датчики усилия, которые установлены на самые нагруженные ваны. Датчики измеряют деформацию в стренде, после чего происходит перерасчет в усилия натяжения. Диапазон измерений составляет от 0 до 240 кН с частотой сбора данных равной 1 Гц. Измерения производятся продолжительностью в 30 минут, после чего определяется среднее значение на данном временном интервале с последующим построением графика изменения усилий в каждой ванте.

На Рис. 3 представлен график изменения усилия нескольких стрендов вант за сутки.

Подсистема изменения динамических показателей выдает динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений колебаний при помощи акселерометров. Акселерометры расположены в точках, наиболее податливых к динамическим воздействиям: верхняя точка пилонов, середина и четверть пролетных строений. 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 ситуации, когда датчик фиксирует значения, превышающие предельные, запись показаний производится с частотой 50 Гц с временным интервалом в 10 минут.

На Рис. 4 показан график изменения ускорений колебаний пилона при значениях, превышающих предельные.

В подсистеме контроля углов и смещений используются одноосевые гравитационно-ориентированные инклинометры, расположенные на промежуточных опорах и пролетных строениях, в местах наиболее подверженных деформации кручения: середина и четверть пролета. Инклинометры смонтированы на уровне проезжей части и измеряют угол поворота в направлении перпендикулярном оси моста. Диапазон измерений $\pm 5^\circ$ с частотой сбора данных 1 Гц. Измерения производятся в 30-ти минутный интервал времени с последующим получением среднего значения, которые отображаются на графике.

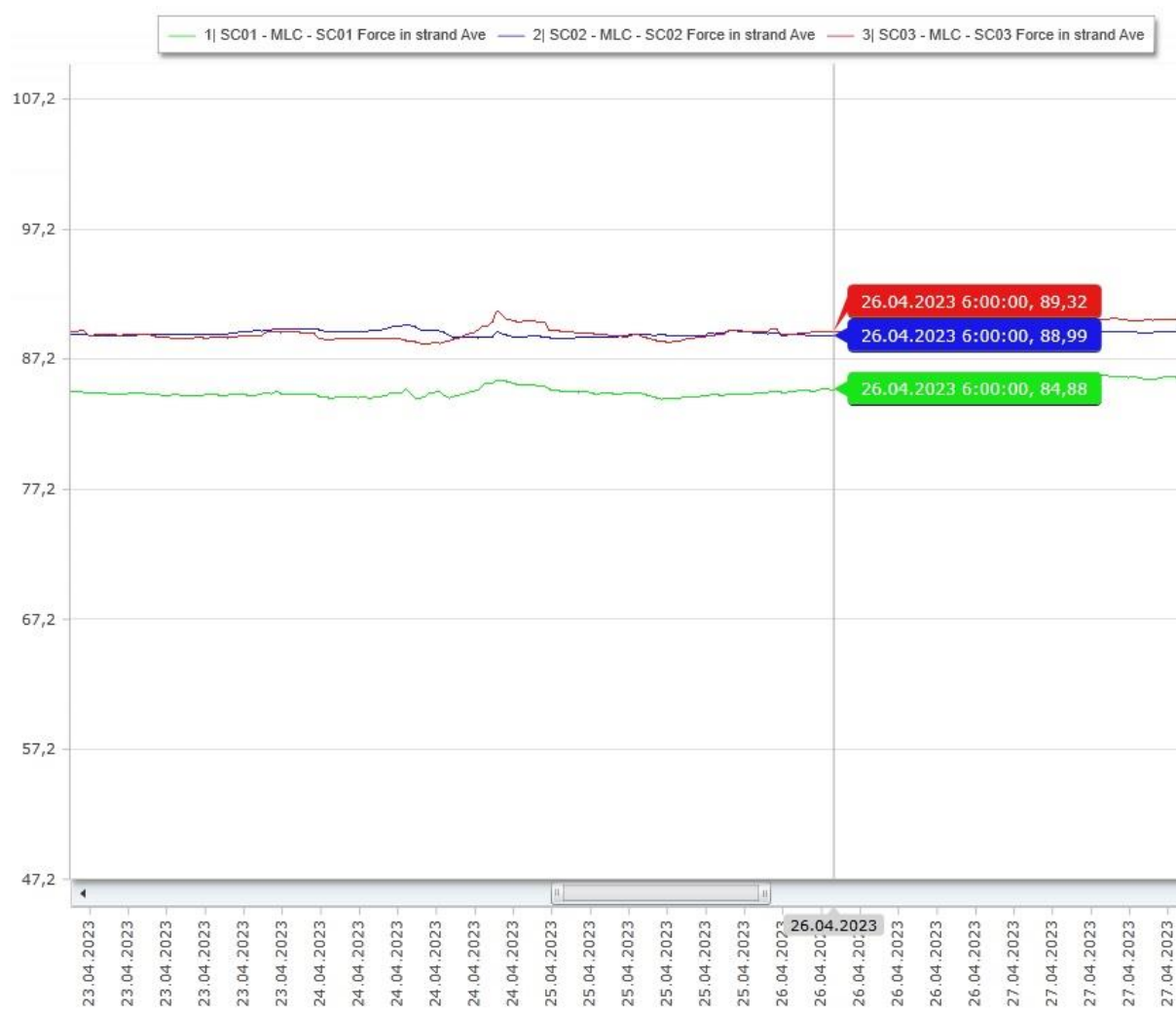
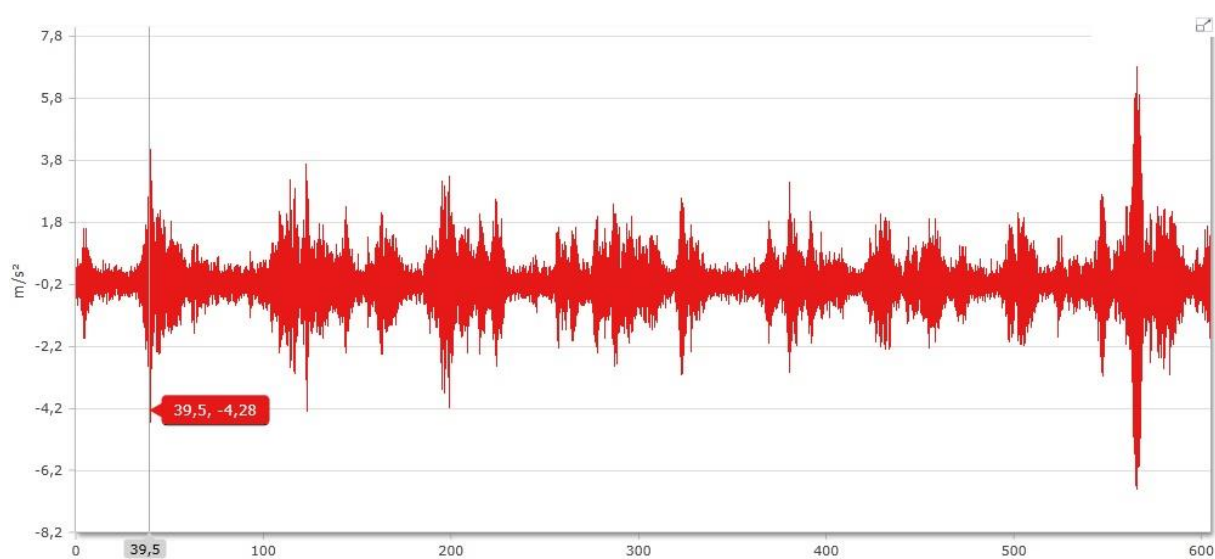


Рис. 3. График изменения усилий в стендах вант

Рис. 4. График изменения ускорений колебаний на пилоне
при превышении предельных значений

На Рис. 5 показан график изменения углов поворота в середине и четвертях пролетного строения.

Для работы подсистемы спутникового позиционирования используются спутниковые приемники, принимающие радиосигналы от спутниковых навигационных систем ГЛОНАС и GPS. Данные спутниковые приемники используются для наблюдения за смещением критических точек, которыми являются верхние точки пилонов и середина пролетного строения. Точность зависит от различных факторов, таких как количество отслеживаемых спутников, геометрия созвездия, время наблюдения, точность эфемерид, ионосферные возмущения. Частота позиционирования составляет 1 Гц с количеством каналов равным 120. Измерения осуществляются по трем координатам (X, Y, Z) в 30-ти минутном интервале с последующим определением среднего значения по каждому из направлений.

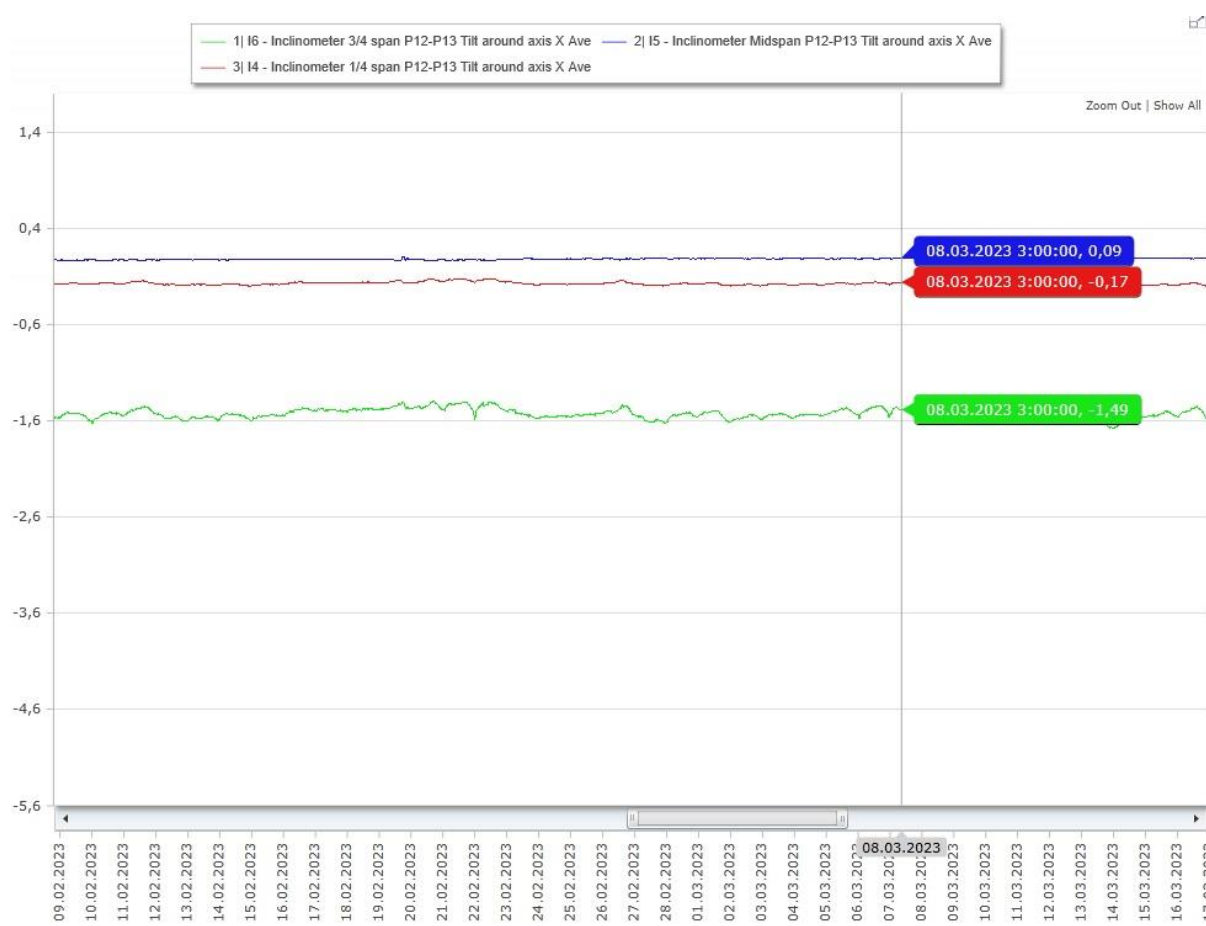


Рис. 5. График изменения углов поворота пролетного строения

На Рис. 6 представлен график с GPS-станции, установленной на пилоне по трем направлениям измерения.

Для работы подсистемы сбора метеоданных используется анеморумбометр, который позволяет измерить скорость и направление ветра. Диапазон измерения скорости составляет от 0 до 60 м/с. Устанавливается прибор на верхней точке пилона. Измерения осуществляются в аналогичном временном интервале с частотой сбора данных 1 Гц. Анеморумбометр позволяет получать максимальные, минимальные и средние значения.

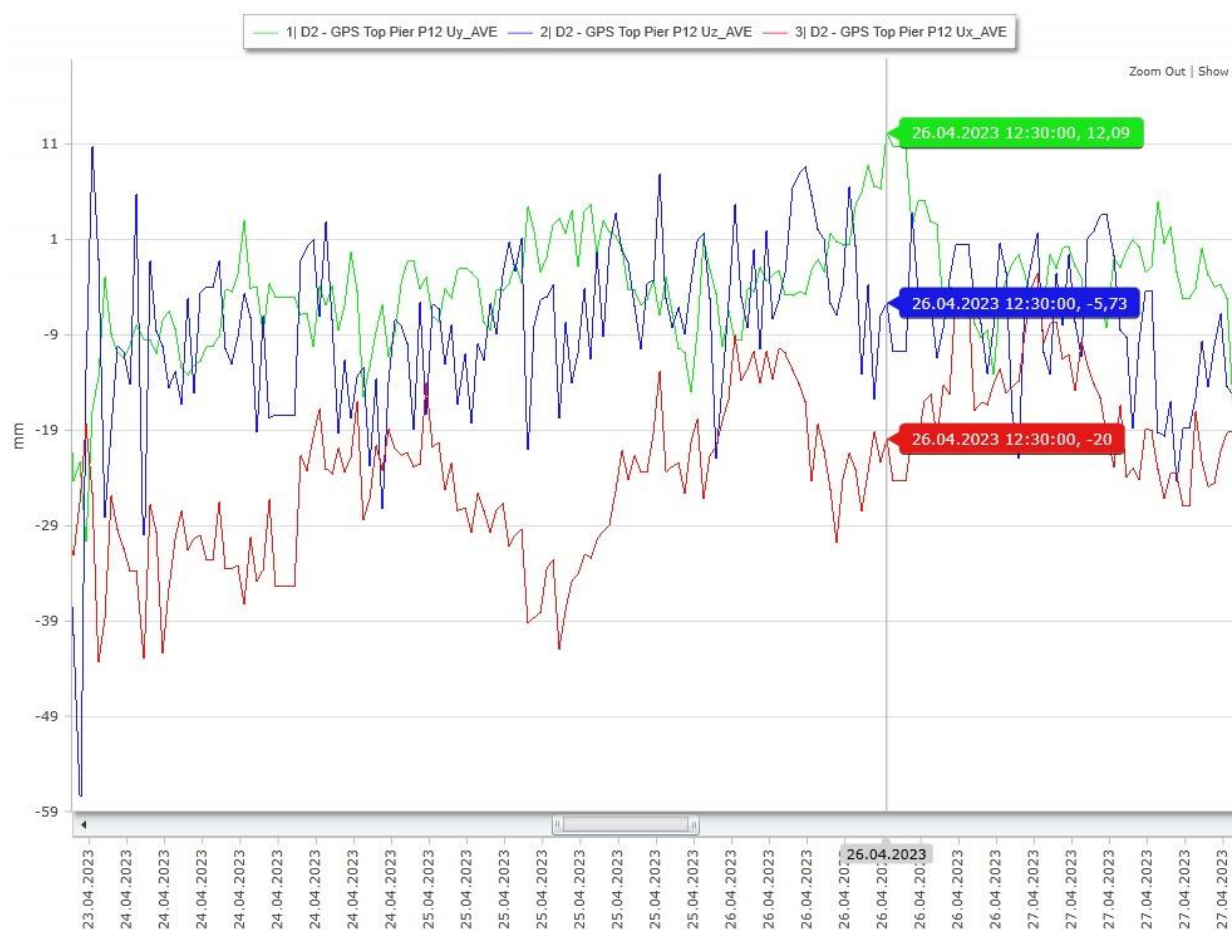


Рис. 6. График изменения смещений верхней точки пилона по трем направлениям

На Рис. 7 показан график изменения средней скорости и среднего направления ветра.

В Табл. 2 приведена сводная ведомость по датчикам, в которой основным параметром следует рассмотреть частоту выходных данных, полученную после анализа СМИК.

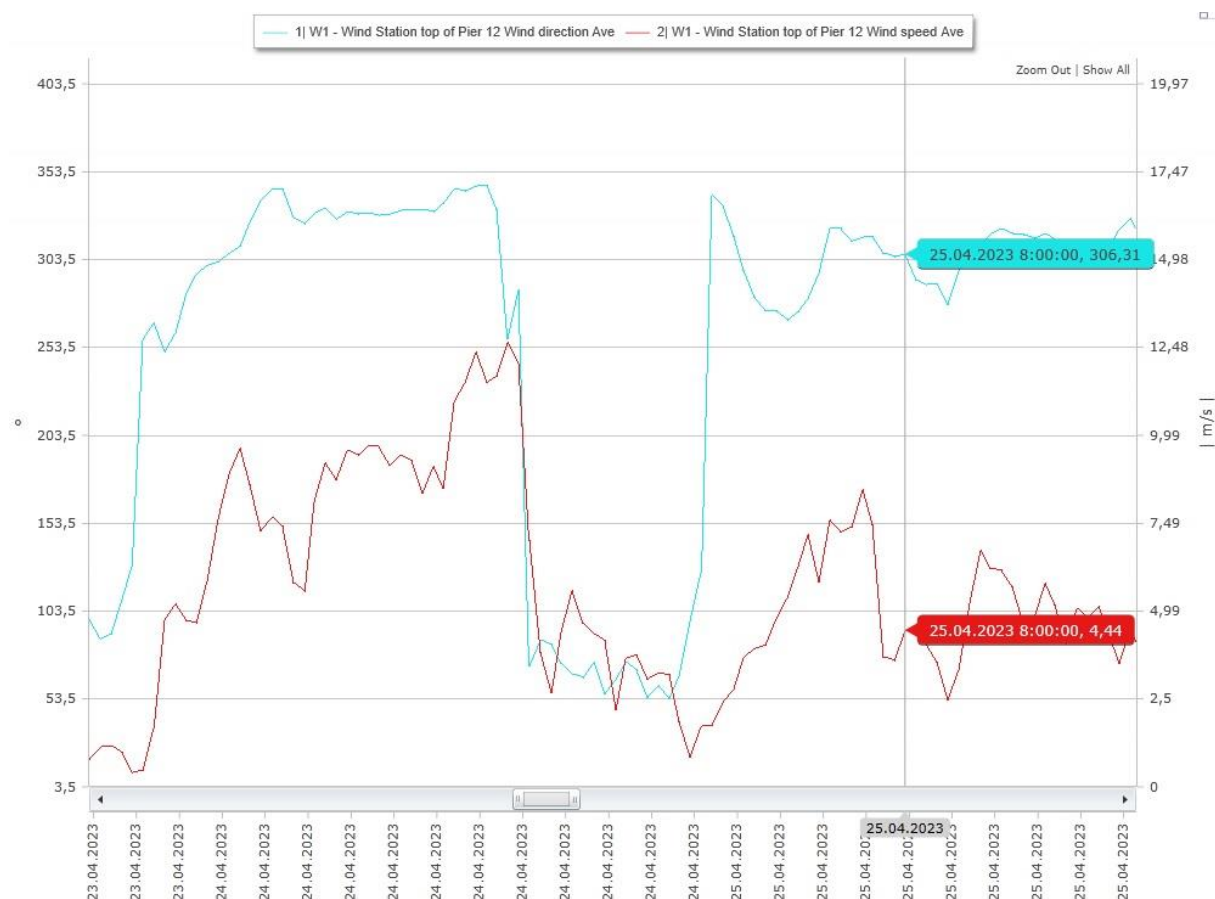


Рис. 7. График изменения средней скорости ветра и среднего направления ветра

Таблица 2. Характеристики датчиков

№ п/п	Наименование датчика	Единицы измерения датчиков	Частота выходных данных, Гц	Временной интервал выходных данных, мин
1.	Датчик усилия вант	кН	0,0005	30
2.	Акселерометр	м/с ²	0,0005/50	30/10
3.	Инклинометр	°	0,0005	30
4.	GPS-станция	мм	0,0005	30
5.	Анеморумбометр	м/с, °	0,0005	30

Из Табл. 2. видно, что частота выходных данных акселерометра имеет значительное превышение в 50 Гц в момент фиксирования значений, превышающих предельные.

В момент фиксирования значений акселерометром, превышающих предельные, другие датчики продолжают выдавать усредненные значения с низкой частотой в 0,0005 Гц, что приводит к невозможности синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени.

Также из анализа результирующих графиков измерений, представленных на Рис. 3–7, учитывая саму цель устройства СМИК, можно констатировать, что каждый измеряемый параметр и временные диапазоны его записи отличны друг от друга, что не позволяет корректно определить причины возникновения нештатных ситуаций, произвести оценку рисков и своевременно принять соответствующие решения в режиме реального времени для недопущения возникновения аварийных ситуаций.

Исходя из выше сказанного следует, что при существующей системе мониторинга возможно производить анализ только отдельных усредненных параметров напряженно-деформированного состояния сооружения, что не позволяет давать корректную оценку об общем техническом состоянии всего мостового сооружения.

ВЫВОДЫ

Авторами статьи проанализирована работа действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в городе Санкт-Петербурге.

Для решения найденной проблемы предлагается:

1. Внести в нормативную документацию рекомендации про необходимость учета синхронизации датчиков в определенный период времени при достижении предельных значений на одном из датчиков системы мониторинга на момент составления проекта СМИК;

2. Произвести оптимизацию системы, при которой получится синхронизировать работу датчиков СМИК в момент фиксации одним из датчиков значений, превышающих предельные, путем единовременной записи соответствующих значений с каждого датчика с максимально возможной частотой.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. ГОСТ Р 59943-2021. Дороги общего пользования. Системы мониторинга мостовых сооружений. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 19 с. [State Standard 59943-2021. Automobile roads of general use. Systems of monitoring bridges. Design rules. Moscow: FGBU “RST”; 2022. 19 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: <https://docs.cntd.ru/document/1200182099>

2. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 120 с. [Vasil'ev AI. Monitoring tehnicheskogo sostojanija mostovyh sooruzhenij: uchebnoe posobie. Moscow: MADI; 2021. 120 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf>
3. Карапетов Э.С., Белый А.А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век». – 2008. – № 4. – С. 80–83. [Karapetov JeS, Belyj AA. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy. Vestnik "Zodchij. 21 vek". 2008;4:80-83. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://elibrary.ru/download/elibrary_13051187_35424783.pdf
4. Васильев А.И. Мониторинг мостовых сооружений. Задачи, возможности, проблемы // Дорожная держава. – 2008. – № 11. – С. 80–82. [Vasil'ev AI. Monitoring mostovyh sooruzhenij. Zadachi, vozmozhnosti, problem. Dorozhnaja derzhava. 2008;(11):80-82. (In Russ.)].
5. 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. [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.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protssessa-opredeleniya-usiliya-v-vantovyh-elementah-mostov-po-chastotam-sobstvennyh-kolebaniy/viewer>
6. 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. [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.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285>
7. 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; 2018. pp. 176-183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743
8. 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. [Bryn MYa, Nikitchin AA, Tolstov EG. Geodesic monitoring of railway transport infrastructure objects. Transport Rossijskoj Federacii. 2010;4(29):58-60. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/geodezicheskiy-monitoring-obektov-infrastruktury-zheleznodorozhnogo-transporta-sputnikovymi-metodami/viewer>
9. 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. – № 2(19) – С. 120–128. [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.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/02_2009.pdf

10. Белый А.А., Ященко А.И., Антонюк А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. – 2020. – № 45(71) – С. 38–45. [Belyi AA, Belov AA, Jashhenko AI, Antonyuk AA. Integralny monitoring mosta Aleksandra Nevskogo. *Putevoi navigator*. 2020;45(71):38-45. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: <https://www.dropbox.com/s/m109hcieixjfx8g/pn-45-2020.pdf?dl=0>
11. Гарамов О.В. Длительный приборный мониторинг автодорожных мостов. Проблемы и перспективы // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2004. – № 1. – С. 27–31. [Garamov OV. Dlitel'nyi priborny monitoring avtodorozhnykh mostov. Problemy i perspektivy. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2004;1:27-31 (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/01_2004.pdf
12. Сырков А.В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 2. – С. 34–38. [Syrkov AV. Puti razvitiya avtomatizirovannykh sistem jekspluatacii i sodержanija avtodorozhnykh iskusstvennykh sooruzhenij. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2014;2:34-38. (In Russ.)].
13. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (монография). СПб: ПГУПС, 2016. [Efanov DV. *Funkcionalniy kontroli monitoring ustroystv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki* (monograph). St. Petersburg: PGUPS; 2016. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: <https://istina.msu.ru/publications/book/182610023/>
14. 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. [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.)].
15. 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. [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.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://atjournal.ru/ru/Home/Download?path=articles%2F2018_Vol.4_No.3_5_beliy.pdf

Сведения об авторах:

Махонько Андрей Андреевич, Инженер отдела дорожного надзора;

eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;

E-mail: makhonkoaa@gmail.com

Мальков Алексей Васильевич, начальник дорожно-эксплуатационной службы;

eLibrary SPIN: 0000-0000; ORCID: 0009-0002-4006-2006;

E-mail: aleksey.malkov@nch-spb.ru

Белый Андрей Анатольевич; к.т.н., доцент;

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

E-mail: andbeliy@mail.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 A. Makhonko, quality control engineer;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com

Aleksey V. Malkov, head of the road maintenance service;
eLibrary SPIN: 0000-0000; ORCID: 0009-0002-4006-2006;
E-mail: aleksey.malkov@nch-spb.ru

Andrey A. Belyi, Candidate of Technical Sciences, Assistant professor;
eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;
E-mail: andbeliy@mail.ru

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

Цитировать:

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

To cite this article:

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. doi: 10.17816/transsyst20239283-96