

На правах рукописи



Махонько Андрей Андреевич

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОЦЕНКИ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ НА ВАНТОВЫХ МОСТАХ**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и
транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель **Лазарев Юрий Георгиевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Коваль Сергей Всеволодович**
доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Яшнов Андрей Николаевич
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мосты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Защита состоится «15» мая 2024 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.53 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, 29, литера Б, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (www.spbstu.ru).

Автореферат разослан « » апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.53,
к.т.н., доцент



Радаев А. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современной инженерной практике применение системы мониторинга инженерных конструкций (СМИК) становится одним из значимых компонентов жизненного цикла внеклассных мостовых сооружений.

Основным критерием работоспособности СМИК служит надежность системы, которая определяется способностью системы непрерывно выполнять необходимые функции в течение установленного времени в соответствии с заданными целями и условиями использования. Обеспечение высокого уровня надежности системы уменьшает вероятность возникновения нештатных ситуаций, следствием которых являются аварийные состояния, приводящие к снижению показателя эксплуатационной безопасности сооружения.

Важно отметить, что система мониторинга инженерных конструкций должна обеспечивать возможность достоверной оценки технического состояния мостового сооружения в момент возникновения нештатной ситуации в кратчайшие сроки для предотвращения ухудшения основных технических показателей мостового перехода.

Мировой опыт показал, что при наступлении нештатных ситуаций не всегда можно точно определить причины срабатывания системы мониторинга. В ряде случаев срабатывание системы происходит по причине сбоя оборудования, что приводит к невозможности достоверного определения технического состояния мостового сооружения. Вследствие чего при каждом ложном срабатывании СМИК эксплуатирующая организация вынуждена производить внеплановые визуально-измерительные осмотры, которые ведут к необоснованным экономическим потерям и нерациональному использованию человеческого ресурса. Важнейшим направлением решения проблемы низкой надежности действующей СМИК является обеспечение требуемого уровня работоспособности всей системы.

Таким образом, **актуальность исследования** обусловлена необходимостью разработки научных методов и технологий, применение которых в отечественной практике при эксплуатации транспортных сооружений на территории Российской Федерации повысит полноту и достоверность информации, обосновывающей качество конструкций и долговечность сооружений с использованием систем мониторинга инженерных конструкций.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями в области работоспособности систем мониторинга инженерных конструкций и достоверной оценки технического состояния мостовых сооружений в разные годы занимались российские и зарубежные ученые: А. А. Белый, М. Я. Брынь, А. И. Васильев, Д. В. Ефанов, А. П. Косауров, П. Ю. Кузьменков, Ю. Г. Лазарев, В. Н. Мячин, А. А. Никитчин, И. Г. Овчинников, Г. В. Осадчий, И. В. Чаплин, А. Н. Яшнов, Т. Al-Zuriqat, М. А. Astiz, А. Cabboi, Á. Cunha, А. Е. Del Grosso, К. Dragos, С. R. Farrar, Р. Furtner, F. Magalhães, J. Mao, С. Moutinho, А. С. Neves, К. Smarsly, Н. Wang, Н. Wenzel, Y. Yang, Y. Zhang.

Работы, выполненные под руководством вышеперечисленных ученых, послужили основой для развития систем мониторинга, а также совершенствованию оценки технического состояния мостовых сооружений.

Однако, накопленный опыт теоретических и экспериментальных исследований показал, что остается необходимость рассмотрения проблемы обеспечения требуемого уровня надежности действующих систем мониторинга инженерных конструкций. Об этом свидетельствуют неработоспособные СМИК на объектах транспортной инфраструктуры нашей страны, несистемные исследования методов оценки работоспособности СМИК, анализа «сырых» данных с датчиков СМИК, анализа причин возникновения сбоев и откликов системы мониторинга, достоверной оценки технического состояния моста при помощи СМИК, а также отсутствие практических рекомендаций по содержанию СМИК в работоспособном состоянии. Таким образом, возникло противоречие между обеспечением требуемого уровня надежности СМИК и необходимостью разработки научных методов и методик оценки работоспособности СМИК, а также практических рекомендаций, повышающих полноту и достоверность информации, обосновывающей качество конструкций и долговечность мостовых сооружений при помощи методов неразрушающего контроля.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке научно-методического аппарата оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах с последующей достоверной оценкой технического состояния мостового сооружения для повышения полноты и достоверности информации, обосновывающей качество конструкций и долговечность мостовых сооружений при помощи методов неразрушающего контроля.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, пункт 11 «Вопросы применения при инженерных изысканиях, проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений прогрессивных методов и технологий, повышающих полноту и достоверность информации, обосновывающей проектные решения, точность расчетов, качество конструкций и долговечность сооружений, их экологичность (аппаратурная диагностика конструкций методами неразрушающего контроля, аэрокосмические, геофизические и геоинформационные системы и технологии и др.)».

Объектом исследования являются процессы эксплуатации системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах.

Предметом исследования являются методы, методики и модели оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах.

Научная задача состоит в разработке научно-методического аппарата оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ современного состояния теории и практики оценки технического состояния вантовых мостов при помощи систем мониторинга инженерных конструкций.

2. Разработан метод оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций вантовых мостов.

3. Разработана методика оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах.

4. Проведена статистическая проверка разработанного научно-методического аппарата оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на больших данных с эксплуатируемого вантового моста.

5. Предложено практическое применение научно-методического аппарата оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций в эксплуатирующей организации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что предлагаемый научно-методический аппарат оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах, в отличие от существующих, позволяет обеспечить требуемый уровень надежности системы мониторинга инженерных конструкций посредством получения зависимостей между срабатываниями СМИК и статистическими характеристиками колебательных процессов конструкций вантовых мостов, а также использования двух ступеней фильтрации входных данных с последующей оценкой технического состояния вантовых мостов, предполагает использование принципов системного подхода, теории вероятностей и математической статистики.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в обосновании научно-методического аппарата оценки работоспособности СМИК, который дополняет и развивает научные исследования в области оценки работоспособности систем мониторинга на мостовых сооружениях, а также в получении зависимостей между срабатыванием СМИК и статистическими характеристиками колебательных процессов конструкций вантовых мостов.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в том, что сформированные практические рекомендации по содержанию СМИК в работоспособном состоянии, а также по оценке технического состояния вантовых мостов внедрены и используются для модернизации действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах.

Методология и методы исследования. В качестве теоретических и общелогических методов научного познания в диссертационном исследовании использованы: элементы теории вероятностей и математической статистики, элементы теории случайных процессов, методы спектрального анализа, преобразование Фурье, статистические методы обработки данных, методы обработки временных рядов, графический метод, анализ, обобщение.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций вантовых мостов.

2. Методика оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах.

Достоверность научных результатов исследования подтверждается применением методов научного исследования, высокой степенью соответствия фактических данных, полученных с сертифицированных и поверенных приборов, и теоретических данных, полученных на основе расчетной модели сооружения, а также использованием результатов исследования на реальных объектах.

Апробация результатов работ. Основные результаты исследования были представлены на конференциях и форумах: международная научно-практическая конференция «Новые технологии в мостостроении. Приоритет 2030» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС 26–27 мая 2022 года); международная научно-практическая конференция «Новые технологии в мостостроении. 140 лет кафедре «Мосты» ПГУПС» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 18–19 мая 2023 года); международный форум «Мосты и тоннели: сокращение сроков строительства, увеличение долговечности» (г. Санкт-Петербург, 17–18 мая 2023 года); ежегодный Петербургский форум «МИР МОСТОВ-2023» (г. Санкт-Петербург, 19–21 сентября 2023 года); международная конференция: Механика, Сейсмостойкость, Машиностроение «Обеспечение сейсмической безопасности и сейсмостойкости зданий и сооружений, прикладные задачи механики», посвященная 90-летию академика АН РУЗ Т. Р. Рашидова (г. Ташкент, 27–29 мая 2024 года).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 6 статей в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 162 страницы, включает 31 таблицу, 65 рисунков и 2 приложения. Список литературы состоит из 185 наименований, в том числе 98 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена и обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна работы, приведены теоретическая и практическая значимость исследования, а также изложены основные научные и практические результаты исследования.

В первой главе приведены теоретические предпосылки и обоснование практической необходимости реализации процессов мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах. Мировой опыт показал, что системы мониторинга инженерных конструкций, установленные на вантовых мостах, активно используются для оценки технического состояния сооружения. Отмечено, что существует проблема ложных срабатываний системы, вызванная сбоями оборудования, которая приводит к невозможности достоверного определения технического состояния мостового сооружения, вследствие чего не предоставляется возможным в кратчайшие сроки определить причины срабатывания системы и обеспечить требуемый уровень безопасности для снижения потенциальных рисков, связанных с возможным причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей среде и близлежащим объектам

инфраструктуры. На примере вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге рассмотрены особенности работы действующей системы мониторинга инженерных конструкций.

При эксплуатации действующей СММК выявлено, что присутствуют нештатные ситуации, связанные с фиксацией акселерометрами ускорений при колебаниях пилонов, которые превышают расчетные предельные значения, равные $\pm 2,5 \text{ м/с}^2$. Схема расположения акселерометров представлена на Рисунке 1.

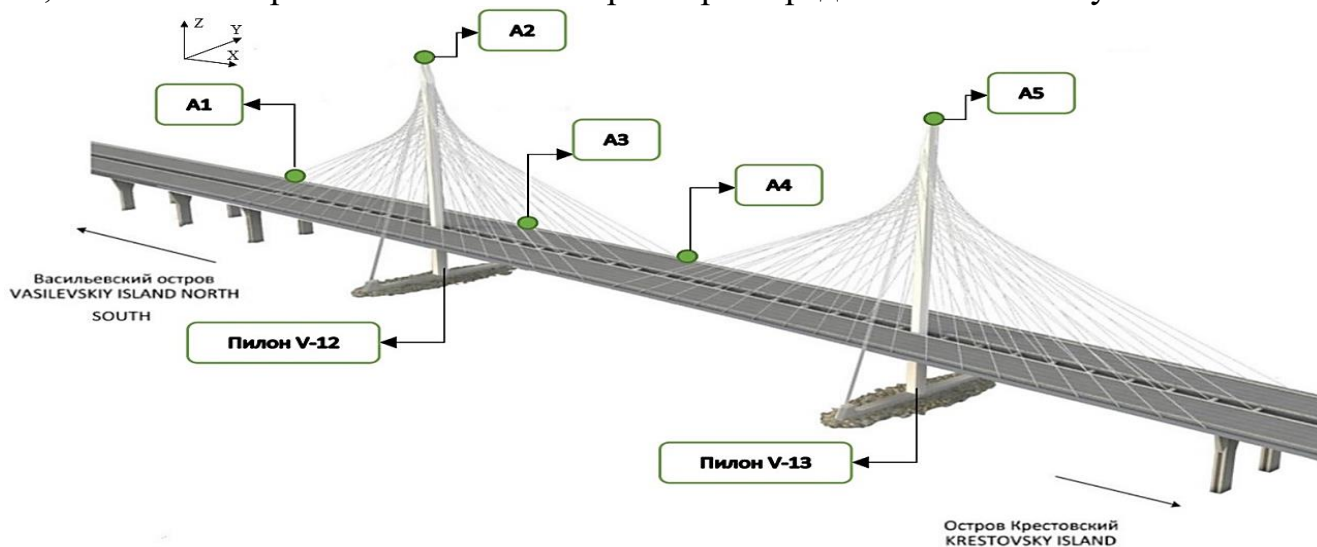


Рисунок 1 – Схема расположения акселерометров на вантовом мосту через Петровский канал в городе Санкт-Петербурге

Анализ работы системы мониторинга показал, что в момент срабатывания СММК различные датчики системы имеют разную частоту дискретизации (Таблица 1). Частота выходных данных акселерометра увеличивается в момент срабатывания системы при превышении расчетных предельных значений ускорений.

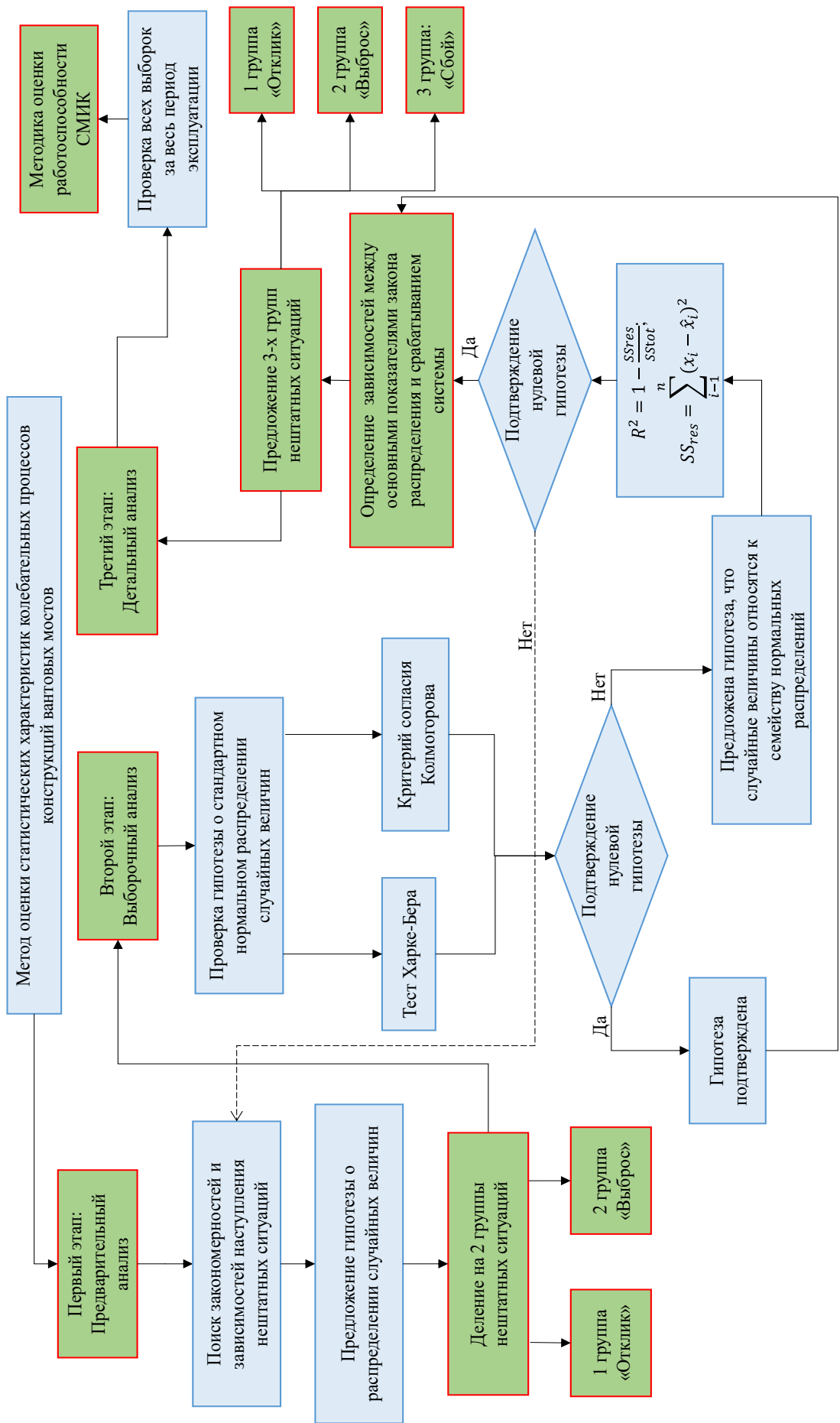
Таблица 1 – Характеристики датчиков СММК

Наименование датчика	Единицы измерения датчиков	Частота выходных данных, Гц	Временной интервал выходных данных, мин.
Датчик усилия вант	кН	0,0005	30
Акселерометр	м/с ²	0,0005/~ 50	30/10
Инклинометр	град.	0,0005	30
GPS-станция	мм	0,0005	30
Анеморумбометр	м/с; град.	0,0005	30

Такая работа СММК не дает в полной мере понять причину срабатывания системы, которая может быть вызвана сбоем аппаратного комплекса или действительным откликом мостового сооружения на динамическое внешнее воздействие, вследствие чего возникает невозможность достоверной оценки технического состояния вантового моста.

Во второй главе предложен научно-методический аппарат оценки работоспособности СММК:

1. Метод оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций вантовых мостов. Блок-схема метода показана на Рисунке 2.



(R^2 – коэффициент детерминации; SS_{res} – сумма квадратов отклонений; SS_{tot} – общая сумма квадратов случайной величины; x_i, \hat{x}_i – эмпирические и расчетные (теоретические) значения объясняемой переменной, м/с².)

Рисунок 2 – Блок-схема метода оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций вантовых мостов (повернуто)

Научная новизна заключается в том, что предложенный метод оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций на вантовых мостах, в отличие от существующих, позволяет обеспечить требуемый уровень надежности системы мониторинга инженерных конструкций посредством получения зависимостей между срабатываниями СМИК и статистическими характеристиками колебательных процессов конструкций вантовых мостов, а также учитывает применение принципов системного подхода, теории вероятности и математической статистики.

Первый этап метода подразумевает поиск закономерностей и зависимостей наступления нештатных ситуаций с целью определения закона распределения случайных величин, полученных с акселерометров.

Предварительный анализ полученных ускорений с акселерометров 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 (Рисунок 3). Такое срабатывание системы определено термином «отклик». Ко второй группе относятся нештатные ситуации, когда срабатывание системы вызвано ошибками в работе акселерометров или преобразователей сигналов, которые были обозначены термином «выброс» (Рисунок 4).

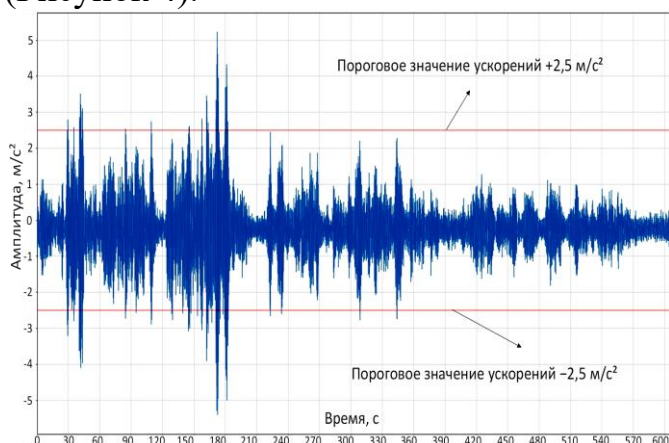


Рисунок 3 – График изменения ускорений при колебаниях на пилоне V-12, полученных с акселерометра A2 (отклик)

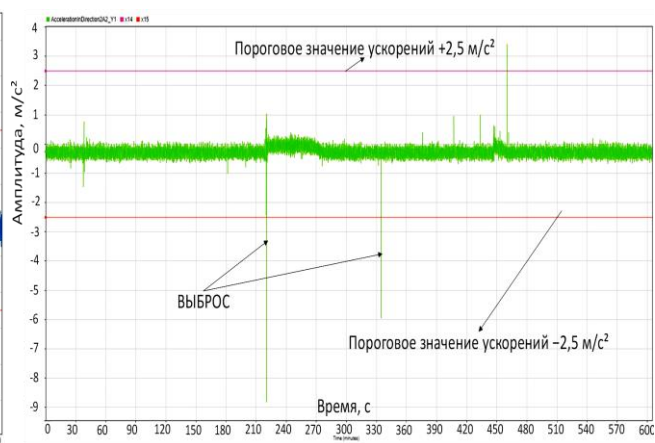


Рисунок 4 – График изменения ускорений при колебаниях на пилоне V-12, полученных с акселерометра A2 (выброс)

Для распределения нештатных ситуаций по двум группам использовался метод анализа, основанный на теории вероятности. Было сделано предположение о том, что случайные величины распределяются по нормальному закону распределения, с последующим построением графика функции плотности вероятности случайной величины для рассматриваемого сигнала.

График функции плотности вероятности (Рисунок 5) представлен равномерно заполненным, о чем свидетельствуют сливающиеся оранжевые точки на графике, которые указывают на то, что распределение близко к нормальному с околонулевым значением математического ожидания. В данном случае принято считать, что срабатывание аварийной системы является обоснованным.

Из графика (Рисунок 6) видно, что функция плотности вероятности заполнена только в центральной околонулевой части, а области максимальных и минимальных

ускорений описываются единичными точками. Из этого следует, что срабатывание системы вызвано ошибками в работе датчиков или преобразователей сигналов.

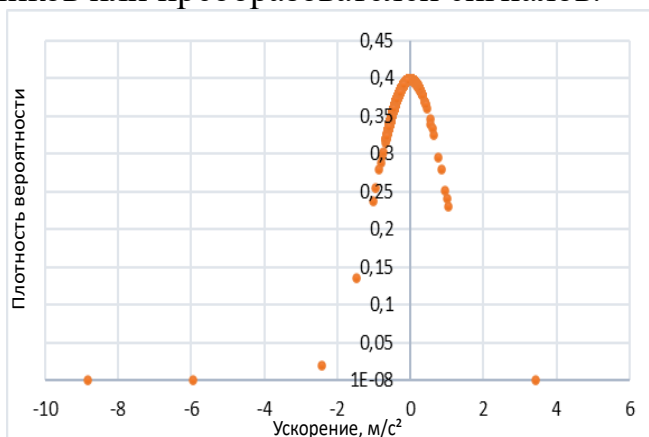
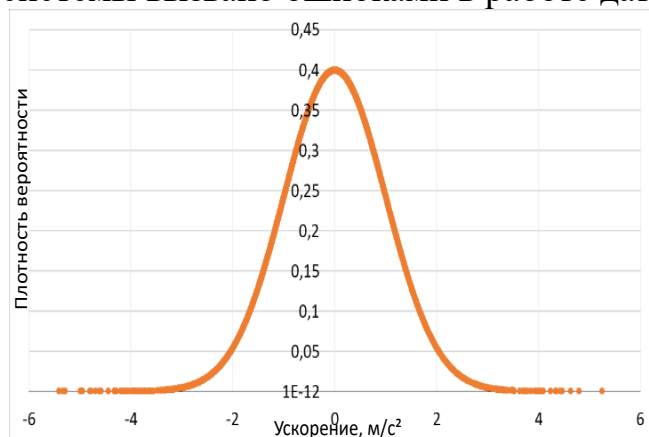


Рисунок 5 – Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра A2 (отклик)

Рисунок 6 – Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра A2 (выброс)

На втором этапе сформулирована гипотеза о том, что случайные значения ускорений, полученные с акселерометров, расположенных на пилонах, распределяются по стандартному нормальному закону распределения. Для проверки гипотезы автор были использованы согласия: тестом Харке – Бера и критерием Колмогорова.

Тест Харке – Бера заключается в сравнении третьего момента (асимметрии) и четвертого момента (эксцесса) фактического распределения случайных величин выборки с моментами стандартного нормального распределения.

$$|\hat{A}| < t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{A}}, \quad (1)$$

$$|\hat{E}| < t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{E}}, \quad (2)$$

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

t – квантиль стандартного нормального распределения равный 1,96 для уровня значимости 95 %;

$|\hat{A}|$, $|\hat{E}|$ – соответственно асимметрия и эксцесс.

Для проведения теста Харке-Бера использовались выборки по 1-й группе, то есть с корректным откликом датчиков. Из результатов следует, что в ряде выборок коэффициент асимметрии удовлетворяет неравенству (1), что показывает симметричность графика распределения относительно 0. При этом коэффициент эксцесса превышает предельное значение (2), что указывает на островершинность кривой и наличие более длинных хвостов, чем у стандартного нормального распределения. При невыполнении одного из условий (1), (2) нулевая гипотеза отвергается, следовательно, случайные величины ускорений не распределены по стандартному нормальному закону распределения согласно тесту Харке-Бера.

Критерий согласия Колмогорова используется для проверки простых гипотез о принадлежности исследуемой выборки известному закону распределения – в данном случае, стандартному нормальному закону.

Статистика критерия определяется по формуле

$$D_n = \sup |F_n(x) - F(x)|, \quad (3)$$

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 распределению, необходимо выполнение условия

$$D_n < D_{кр}, \quad (4)$$

где $D_{кр}$ – критическое число по критерию Колмогорова, которое определяется из объема выборки n .

При проверке по критерию Колмогорова использовались также выборки из 1-й группы. Полученные результаты подтверждают, что случайные величины ускорений при колебаниях, полученные с акселерометров, расположенных на пилонах, не распределяются по стандартному нормальному закону распределения.

Стоит отметить, что кривая функции плотности вероятности (см. Рисунок 5) имеет колоколообразную форму и стремится к симметричности относительно оси абсцисс. Согласно тесту Харке-Бера, коэффициент асимметрии в ряде случаев близок к нулю. В результате выдвинута гипотеза о том, что исследуемые случайные величины относятся к семейству нормальных распределений с отличными от 0 и 1 значениями математического ожидания и стандартного отклонения соответственно.

Чтобы проверить гипотезу, описанную выше, необходимо подобрать такое нормальное распределение, которое будет максимально приближено к эмпирическому распределению случайных величин, полученных с акселерометров. Для этого применен коэффициент детерминации, определяемый по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \quad (5)$$

где SS_{res} – сумма квадратов отклонений эмпирических значений от расчетных;

SS_{tot} – общая сумма квадратов отклонений эмпирических значений от среднего.

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2, \quad (6)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2, \quad (7)$$

где x_i , \hat{x}_i – эмпирические и расчетные (теоретические) значения объясняемой переменной, м/с².

Для проверки гипотезы были проанализированы произвольные выборки случайных величин ускорений при колебаниях пилонов, полученные при срабатывании системы мониторинга. На этапе выборочного анализа проведена проверка выборок случайной величины ускорений за 2022 год (Рисунок 7).

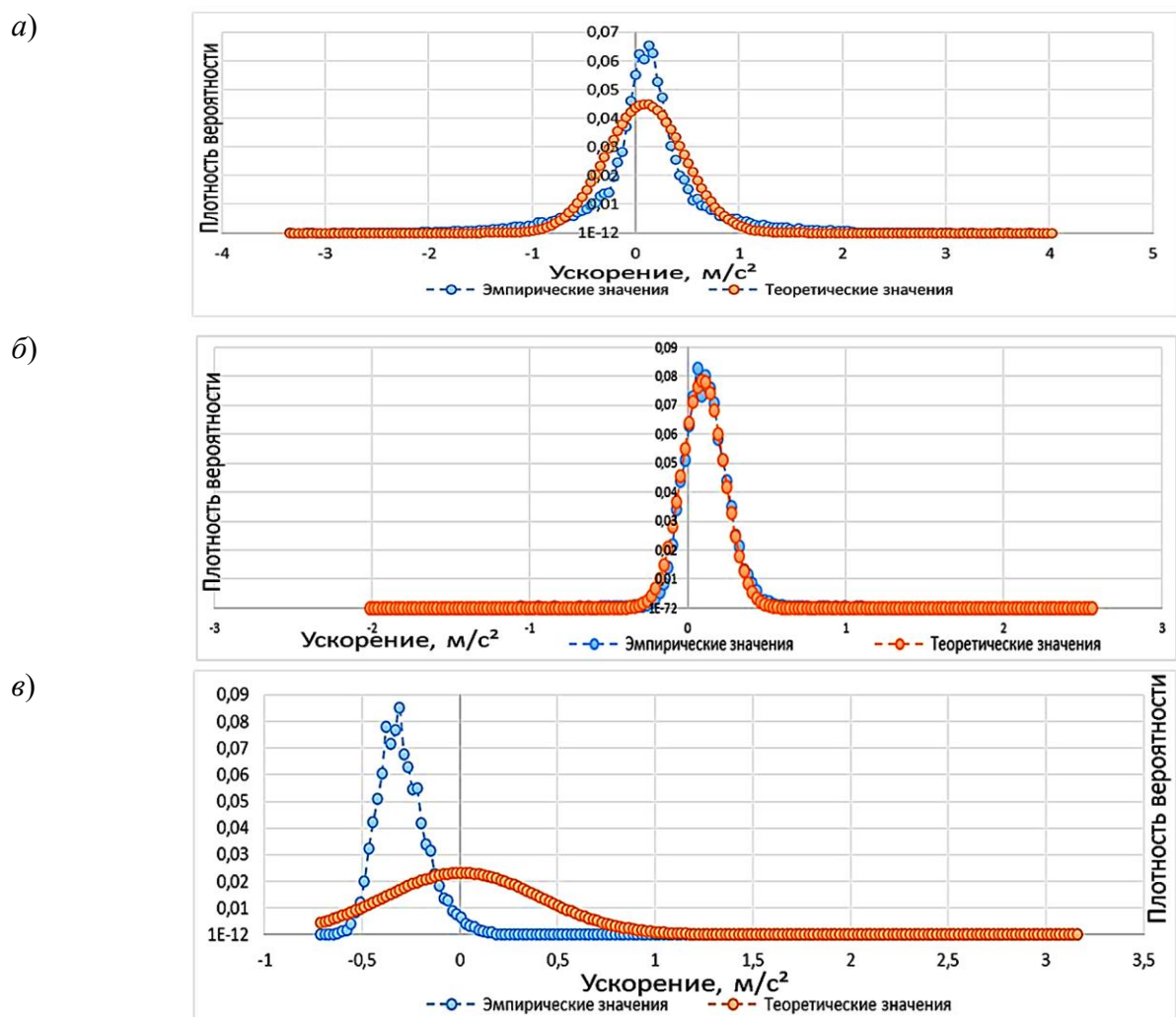


Рисунок 7 – Эмпирическая и теоретическая функции плотности вероятности случайной величины ускорений 1-й (а), 2-й (б) и 3-й (в) группы

Из результатов проверки гипотезы следует, что случайные величины распределены в большей степени по нормальному закону распределения (см. Рисунок 7,а и Рисунок 7,б) с различными значениями математического ожидания и стандартного отклонения. Однако, присутствуют выборки, где коэффициент детерминации меньше, чем в остальных случаях, а сумма квадратов отклонений значительно больше. Из вышесказанного сделан вывод, что предположение о разделении нештатных ситуаций на 2 группы принципиально верно. Однако для более детального описания нештатных ситуаций применено разделение на 3 группы.

К 1-й группе относятся случаи, когда срабатывание системы корректное и вызвано динамическим откликом конструкции на возбуждающие внешние силы. Коэффициент детерминации стремится к 1, что показывает практически идеальную сходимость с теоретической математической моделью закона распределения. График функции плотности вероятности нормального распределения получается более пологим с менее длинными хвостами (см. Рисунок 7,а), что характеризуется показателем стандартного отклонения, значения которого получаются выше, чем в двух других группах.

Ко 2-й группе относятся нештатные ситуации, вызванные единичными случаями достижения предельных значений ускорений при колебаниях; при этом

график функции плотности вероятности нормального распределения получается островершинным с длинными хвостами (см. Рисунок 7,б), что указывает на небольшой разброс случайных величин относительно среднего значения. Коэффициент детерминации имеет значения около 1. Такие нештатные ситуации названы выбросами.

В 3-ю группу входят нештатные ситуации, которые вызваны сбоями оборудования, что следует из значений коэффициента детерминации, который значительно меньше, чем в 1-й и 2-й группе. В то же время сумма квадратов отклонений в разы превышает значение равное 1. Также стоит отметить, что при визуальном анализе графика функции плотности вероятности видно (Рисунок 7,в), что закон распределения отличается от нормального закона и является несимметричным относительно оси абсцисс. Нештатные ситуации, относящиеся к 3-й группе, принято обозначать сбоями.

Выборочный анализ нештатных ситуаций за один год эксплуатации системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал города Санкт-Петербурга показал, что существует зависимость между срабатыванием системы и полученными характеристиками нормального закона распределения: стандартным отклонением, общей суммой квадратов отклонений и коэффициентом детерминации.

На третьем этапе метода производится проверка всех выборок за весь период эксплуатации мостового сооружения для полного подтверждения гипотезы о нормальном распределении случайных величин ускорений при колебаниях, а также подтверждаются численные зависимости между срабатыванием системы и статистическими характеристиками нормального закона распределения: стандартным отклонением, общей суммой квадратов отклонений и коэффициентом детерминации.

2. Методика оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах. Блок-схема методики представлена на Рисунке 8.

Научная новизна заключается в том, что предложенная методика оценки работоспособности СМИК, в отличие от существующих, предполагает использование двух ступеней фильтрации входных данных с последующей оценкой технического состояния вантового моста, что приводит к обеспечению требуемого уровня надежности системы мониторинга инженерных конструкций, а также учитывает применение принципов системного подхода.

Методика включает в себя определение группы нештатных ситуаций по полученным зависимостям, применение двух ступеней фильтрации выходных данных, проведение оценки работоспособности СМИК и технического состояния вантового моста с последующим назначением соответствующих категорий работоспособности системы и технического состояния вантового моста.

Отмечено, что предложенная методика основана на полученных данных с акселерометров, и при рассмотрении выборок данных с других датчиков СМИК необходимо сначала произвести оценку полученных выборок данных при помощи метода оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций вантовых мостов.

переход к двум ступеням фильтрации, где 1-я ступень фильтрации предполагает исключение 3-й группы «Сбой» нештатной ситуации. Если выборка относится к 3-й группе, то после 1-й ступени фильтрации процесс оценки работоспособности завершается. При присвоении выборке данных 1-й или 2-й группы, осуществляется переход на 2-ю ступень фильтрации, которая заключается в обработке «сырых» данных 1-й и 2-й группы нештатных ситуаций.

В рамках исследования рассмотрено 4 метода обработки «сырых» данных, а именно статистические методы и методы обработки временных рядов. К первой группе относятся методы «99-й перцентиль» и «3 сигма». По методам обработки временных рядов были проанализированы две модели: «ARIMA» и «ETS».

После 2-й ступени фильтрации с помощью модального анализа определяются фактические частоты собственных колебаний, которые сравниваются с теоретическими частотами расчетной модели для оценки технического состояния вантового моста.

Для построения графика спектра Фурье функции колебания системы необходимо использовать отфильтрованные ускорения. Затем, используя интегральное преобразование Фурье, которое рассчитывается по формуле

$$\tilde{Y}_d(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i\omega t} dt, \quad (8)$$

(где $\tilde{Y}_d(\omega)$ – спектральная плотность сигнала, представляющая собой функцию частоты, Гц; $x(t)$ – временной ряд данных ускорений при колебаниях, полученных с акселерометров, м/с²; i – мнимая единица; ω – угловая частота, рад./с), из полученного спектра $\tilde{Y}_d(\omega)$, определяются частоты собственных колебаний вантового моста с исследованием пиков или максимальных значений на спектре.

Предложены интервалы расхождений частот, которые показывают степень технического состояния мостового сооружения в зависимости от процентного расхождения фактической и теоретической частоты собственных колебаний.

По полученным расхождениям частот мостовому сооружению присваивается категория технического состояния (Таблица 2).

Таблица 2 – Категории технического состояния мостового сооружения

Категория технического состояния	Δf , %
Исправное состояние	0 – 10
Работоспособное состояние	11 – 30
Ограниченно работоспособное состояние	31 – 60
Неработоспособное состояние	61 – 90
Предельное состояние	91 – 100

При назначении категории «исправное состояние» оценка работоспособности СМИК завершается; в противном случае производится анализ тренда показателя расхождения фактических и теоретических частот собственных колебаний за весь период эксплуатации. Если за рассмотренный период эксплуатации мостового сооружения просматривается увеличение расхождений фактических и теоретических частот, то необходимо обследовать конструкции моста на предмет возникновения дефектов и оценить степень их влияния на

эксплуатационную надежность. В случае отсутствия увеличения расхождений частот необходимо произвести корректировку работы действующей СМИК.

Отмечено, что одним из основных показателей методики оценки работоспособности СМИК является показатель вероятности безотказной работы системы, который рассчитывается по формуле

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (9)$$

где $n(t)$ – число сбоев (отказов) за время t ;

N_0 – исходное число срабатываний системы.

В зависимости от значения показателя вероятности безотказной работы системе мониторинга инженерных конструкций присваивается одна из категорий работоспособности системы, представленных в Таблице 3.

Таблица 3 – Категории работоспособности системы

Категория работоспособности системы	$P(t)$, %
Исправное состояние	100–80
Работоспособное состояние	79–50
Ограниченно работоспособное состояние	49–20
Неработоспособное состояние	19–0

В третьей главе диссертации проведена статистическая проверка разработанного научно-методического аппарата оценки работоспособности СМИК на больших данных в количестве 889 случаев срабатывания акселерометров, расположенных на вершинах пилонов вантового моста.

Получено, что корректным откликом системы мониторинга принято срабатывание СМИК, при котором стандартное отклонение выборки данных ускорений будет больше или равно 0,33, значение суммы квадратов отклонений меньше 1, а коэффициент детерминации больше или равен 0,97. К сбоям (3-я группа) относятся выборки, у которых сумма квадратов отклонений больше 1 и коэффициент детерминации меньше 0,97. После распределения нештатных ситуаций по 1-й и 3-й группе, оставшиеся выборки данных ускорений будут отнесены ко 2-й группе.

Полученные зависимости использованы при 1-й ступени фильтрации данных ускорений. После использования 1-й ступени фильтрации количество ложных срабатываний уменьшилось на 33 %, что повышает надежность всей системы мониторинга инженерных конструкций.

Приведен анализ работы рассматриваемых методов обработки «сырых» данных для использования во 2-й ступени фильтрации. Для выбора одного из методов были проанализированы все случаи срабатывания СМИК после 1-й ступени фильтрации, а именно 600 нештатных ситуаций. При использовании статистических методов рассмотрены два принципа отбрасывания отфильтрованных случайных величин: тип 1 – замена значений выброса на среднее значение всей выборки; тип 2 – замена значений выброса на среднее значение двух соседних случайных величин.

Из результатов следует, что статистические методы отфильтровали 85–86 % всех выборок, что, в свою очередь, на 28–29 % больше по сравнению с моделью «ARIMA». Модель «ETS» показала, что при различных параметрах сглаживания во всех рассмотренных выборках фильтрация не производится должным образом.

Сделан вывод, что при использовании описанных методов полностью избавиться от единичных выбросов не представилось возможным. В то же время, было получено, что при перефильтрации данных с частичным удалением экстремумов происходит дофильтрация данных, приводящая к возникновению дополнительных сбоев. Таким образом, случайные величины отфильтрованной выборки, в которой произошли потери экстремумов, не распределяются по нормальному закону распределения, что указывает на перераспределение таких выборок в 3-ю группу нештатных ситуаций.

В исследовании оптимальным выбором для 2-й степени фильтрации является метод «3 сигма» с отбрасыванием отфильтрованных случайных величин, путем замены значений выброса на среднее значение двух соседних величин выборки (тип 2), вследствие наименьшего показателя неотфильтрованных выборок и количества дополнительных сбоев.

После применения 2-й степени фильтрации осталось 419 нештатных ситуаций, по которым производилась оценка технического состояния вантового моста.

Для оценки технического состояния мостового сооружения по полученным ускорениям при колебаниях пилонов были определены фактические частоты собственных колебаний, которые далее сравнивались с проектными значениями частот (Рисунок 9).

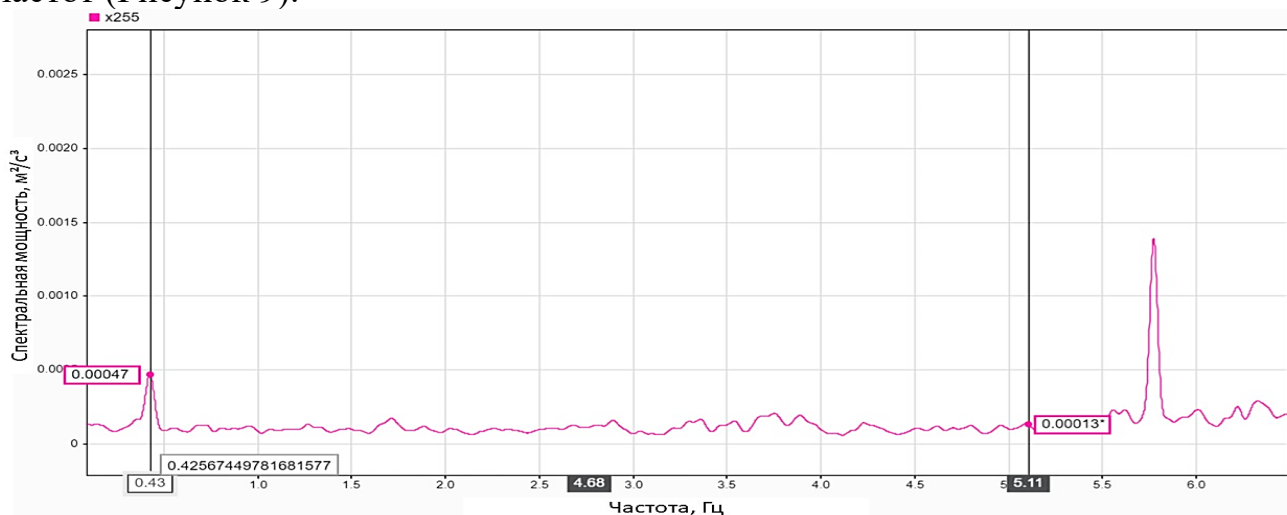


Рисунок 9 – Спектральная плотность выборки «10.09.2020 (23_16)» (по оси абсцисс на графиках показаны частоты, которые измеряются в Гц, а по оси ординат спектральная мощность, единица измерения которой является $\text{м}^2/\text{с}^3$ или дБ)

Результаты сравнения показали, что расхождения фактических и проектных частот находятся в диапазоне от 0 % до 2,81 %, что показывает высокую сходимость между фактической работой конструкции и проектной моделью.

При оценке частот колебаний, полученных из выборок данных 2017–2018 годов эксплуатации мостового сооружения следует, что среднее значение расхождений фактических и проектных значений частот составляет 1,23 %, из чего

сделаны выводы: после монтажа СМИК система мониторинга находилась в работоспособном состоянии; данные, полученные с акселерометров, являются корректными для оценки технического состояния сооружения.

Анализ фактических частот колебаний показал, что в большей степени выделяются 4-я и 5-я формы колебаний (Рисунки 10,*а* и 10,*б*), распределенные в процентном соотношении 20:80 от общего числа рассмотренных выборок соответственно. Это свидетельствует о том, что вантовый мост более податлив к кососимметричному изгибу пилонов, а также к s-образному горизонтальному изгибу балки жесткости. Кроме того, отмечено, что в 3 % случаев также выделяется 7-я форма колебаний (Рисунок 10,*в*).

Выполненный анализ также установил, что помимо выделения частот собственных колебаний по 4-ой, 5-ой и 7-ой форме колебаний, выделяются два диапазона высоких частот: 0,94–6 Гц и 13–20 Гц.

Пики на частотах 0,94–6 Гц соответствуют либо очень высоким формам колебаний пилонов, либо колебаниям отдельных частей конструкции – таких, как лестница внутри пилона или архитектурный элемент наверху пилона, похожий на «свисток».

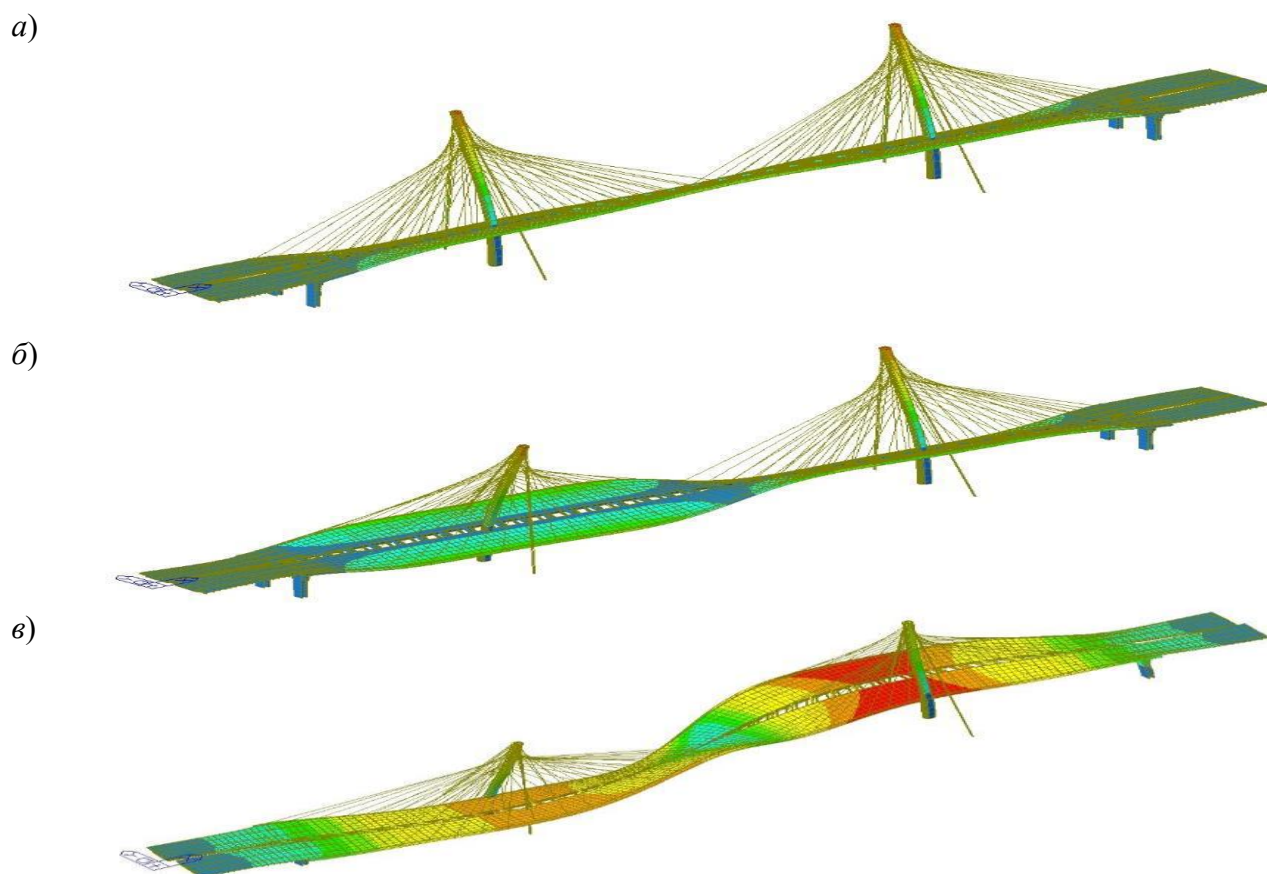


Рисунок 10 – Формы колебаний вантового моста: а) – 4-я – симметричная форма колебаний пилонов в поперечно плоскости (частота собственных колебаний – 0,409 Гц); б) – 5-я – кососимметричная форма колебаний пилонов в поперечной плоскости (частота собственных колебаний – 0,427 Гц); в) – 7-я – горизонтальная s-образная форма колебаний балки жесткости (частота собственных колебаний – 0,703 Гц)

Отмечено, что присутствие высокочастотных компонент с частотой 13–20 Гц искажает полезный сигнал о колебаниях конструкции. Такие высокочастотные колебания вызваны периодическим краткосрочным сбоем акселерометра в момент

бесперывной записи множества данных на протяжении 600 секунд, а также работой преобразователя сигнала. Еще одной причиной возникновения такого явления могут быть скачки напряжения в кабельных линиях и датчиках вследствие сильного ветра или грозы.

Сделан вывод, что вантовый мост через Петровский канал в городе Санкт-Петербурге находится в нормативном состоянии, а конструкции моста находятся в штатном рабочем состоянии. Вантовому мосту через Петровский канал присвоена категория технического состояния – **исправное состояние**.

По полученным значениям показателя вероятности безотказной работы сделан вывод, что первые годы эксплуатации (2017–2019 гг.) система мониторинга инженерных конструкций находилась в работоспособном состоянии, что отвечает требованиям нормативной документации о средней наработке на отказ СМИК не менее 10000 ч. В последующие годы наблюдается рост количества сбоев, что приводит к уменьшению значения показателя безотказной работы системы. Сделан вывод, что категория работоспособности системы СМИК на вантовом мосту через Петровский канал относится к **ограниченно работоспособному состоянию**, что показывает необходимость проведения комплексных мер по модернизации действующей СМИК.

Четвертая глава посвящена практическому применению предложенного научно-методического аппарата оценки работоспособности СМИК в эксплуатирующей организации.

Проведен анализ факторов, влияющих на вантовый мост в период эксплуатации, для определения причин возникновения многочисленных сбоев системы мониторинга. В рамках исследования рассматривались следующие факторы: температура окружающей среды, направление ветра, скорость ветра, интенсивность временной нагрузки. При анализе оценивались 1-я и 3-я группы нештатных ситуаций, так как единичные выбросы по 2-й группе вызваны краткосрочными перепадами напряжения или ошибками при обработке массива входных данных с акселерометра.

Результаты показали, что присутствует прямая зависимость между сбоями и двумя параметрами – направлением ветра и температурой окружающей среды. Основное количество сбоев приходится на летний период и составляет 41 %, что свидетельствует о влиянии высокой температуры на работоспособность акселерометров и их компонентов. Средняя температура летом за весь период эксплуатации составила 20,5 °С, а максимальная температура достигла отметки 29,4 °С.

Получена зависимость между сбоями системы и направлением ветрового потока. Сбой системы происходит при Северо-Западном (315° – 333,5°) и Северо-Восточном (22,5°) направлении ветрового потока (Рисунок 11,а).

Анализ интенсивности движения при сбоях и корректном срабатывании системы показал, что закономерности отсутствуют из-за низкой интенсивности в момент срабатывания системы. Согласно аналитике эксплуатирующей организации, максимальная интенсивность движения приходится на утреннее время и послеобеденное дневное, в то время как срабатывание системы происходит равномерно в течение суток.

Корректное срабатывание системы происходит в большей степени в зимний период года и составляет 58 %, что также подтверждает влияние высоких температур на некорректную работу элементов системы. Оценка воздействия ветрового потока на срабатывание системы мониторинга показала, что в 63 % случаев срабатывает система из-за отклика акселерометра А2, расположенного на пилоне V-12. Следует отметить, что при южном направлении ветра срабатывание СММК происходит на акселерометре А5, расположенном на северном пилоне V-13, а при северном направлении ветра отклик системы происходит на южном пилоне V-12 (Рисунок 11,б).

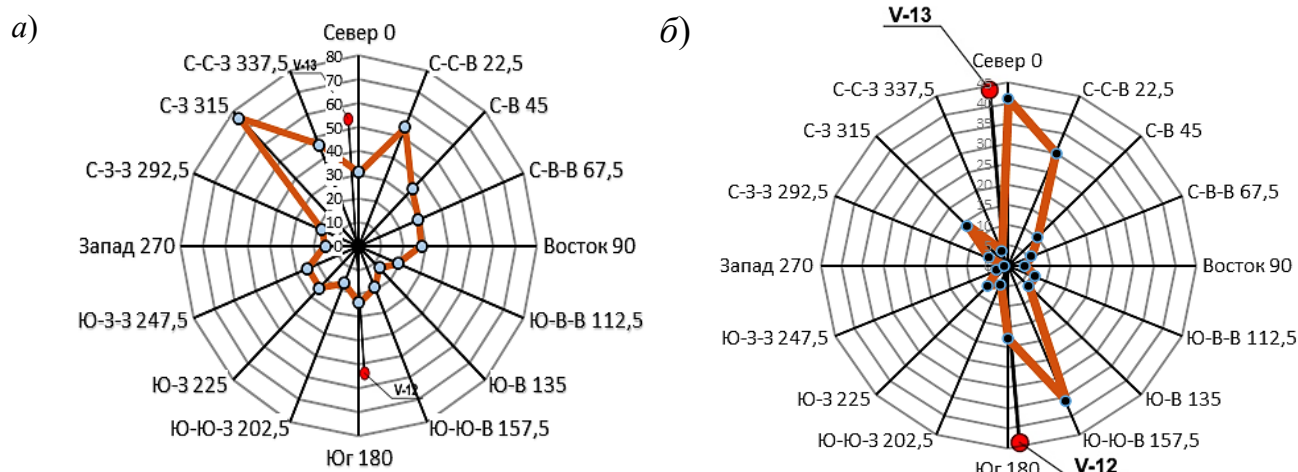


Рисунок 11 – Роза ветров, построенная по выборкам 3-й (а) и 1-й (б) группы нештатных ситуаций

Направление ветра во всех случаях близко к направлению ветра вдоль вантового моста. При данном направлении ветра возможны колебания моста, вызванные откликом на турбулентный ветровой поток или срывы вихрей. Такое явление вызвано наличием в верхней части пилона архитектурного отверстия. При проходе ветрового потока под определенным углом через отверстия в пилоне возникают вихревые потоки, которые приводят к высокочастотным колебаниям архитектурного элемента «свисток» или металлических элементов внутри пилона, что подтверждается анализом спектральных плотностей и выделением высоких частот 0,94–6 Гц. Такие высокочастотные колебания не влияют на работоспособность конструкций вантового моста и не противоречат безопасному использованию мостового сооружения пользователями автомобильной дороги.

Расчет экономической эффективности показал, что визуально-измерительный осмотр при единичном ложном срабатывании СММК составляет порядка 133 тыс. рублей. При этом экономические потери за весь период эксплуатации из-за 470 ложных срабатываний составили 65518807,8 руб., что эквивалентно приблизительно 9,4 млн. руб. за каждый год эксплуатации.

Даны **практические рекомендации** в разрезе следующих направлений: рекомендации по содержанию СММК в работоспособном состоянии; рекомендации по оценке технического состояния вантового моста (Рисунок 12).

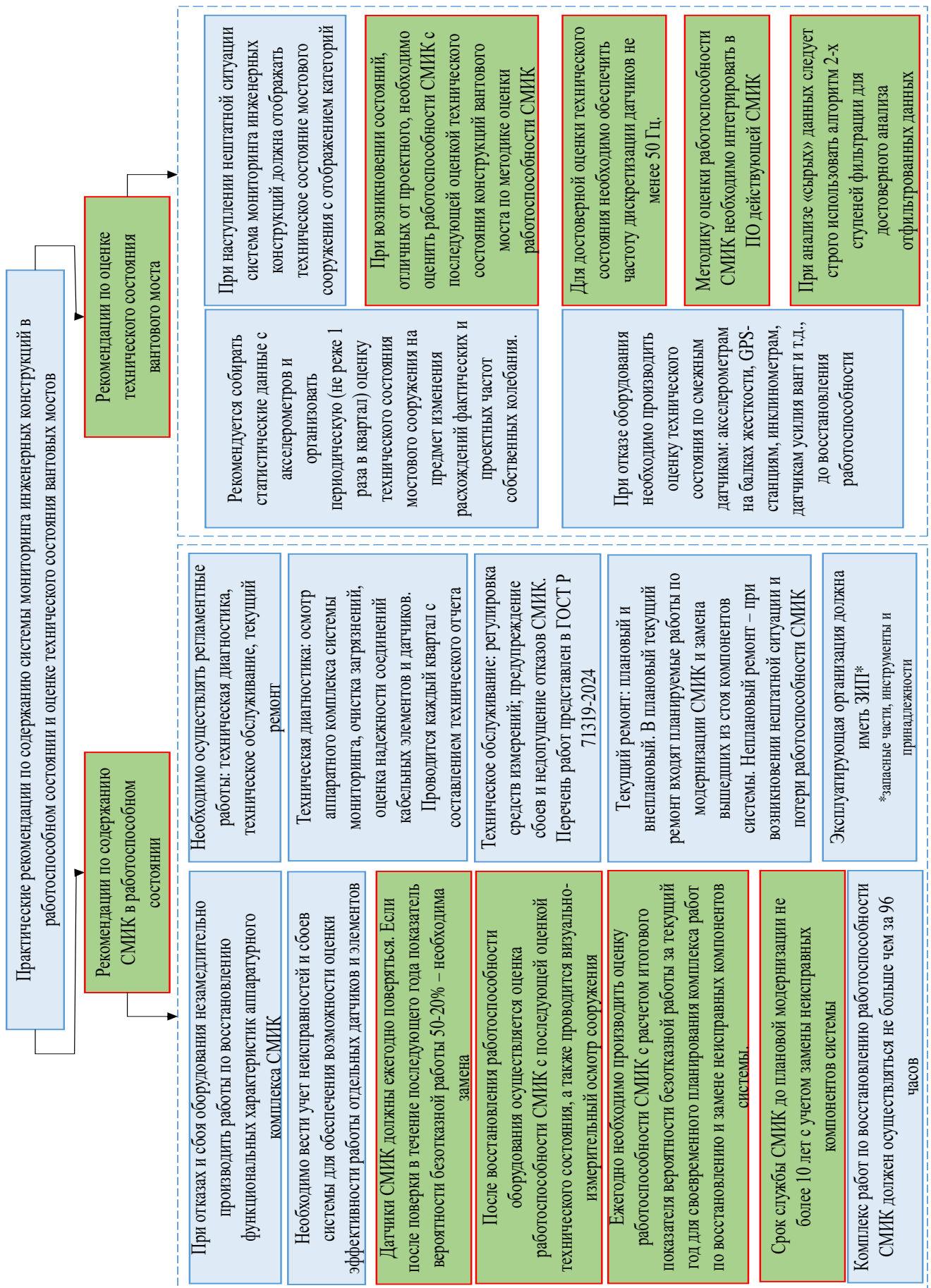


Рисунок 12 – Принципиальная схема практических рекомендаций по содержанию СМИК в работоспособном состоянии и достоверной оценки технического состояния вантового моста (повернуто)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании достигнута цель, решены поставленные задачи и получены основные научные выводы:

1. Выполнен анализ особенностей работы системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах применительно к реальному объекту.

2. Разработан метод оценки статистических характеристик колебательных процессов конструкций вантовых мостов, который позволяет обеспечить требуемый уровень надежности системы мониторинга инженерных конструкций посредством получения зависимостей между срабатываниями СММК и статистическими характеристиками колебательных процессов конструкций вантовых мостов, а также учитывает применение принципов системного подхода, теории вероятности и математической статистики.

3. Получены зависимости между группой нештатных ситуаций и численными показателями: стандартным отклонением, суммой квадратов отклонений и коэффициентом детерминации, которые использованы при 1-й ступени фильтрации. После использования 1-й ступени фильтрации количество ложных срабатываний уменьшилось на 33 %, что повышает надежность всей системы мониторинга инженерных конструкций.

4. Анализ 4 методов обработки «сырых» данных показал, что случайные величины, распределенные по нормальному закону, лучше подвергаются фильтрации при использовании статистических методов отброса лишних экстремумов. В диссертационном исследовании предложено использовать метод «3 сигма» с отбрасыванием отфильтрованных случайных величин, путем замены значений выброса на среднее значение двух соседних величин выборки (тип 2).

5. Разработана методика оценки работоспособности СММК, которая предполагает использование 2-х ступеней фильтрации входных данных с последующей оценкой технического состояния вантового моста, что приводит к обеспечению требуемого уровня надежности системы мониторинга инженерных конструкций, а также учитывает применение принципов системного подхода.

6. По результатам оценки технического состояния отмечено, что расхождения фактических и проектных частот собственных колебаний находятся в диапазоне от 0 % до 2,81 %. При анализе технического состояния вантового моста через Петровский канал получено, что мосту присваивается категория технического состояния – **исправное состояние**. Данное заключение подтверждает, что элементы мостового перехода работают в штатном режиме и безопасная эксплуатация сооружения обеспечена.

7. При использовании методики оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал системе мониторинга присвоена категория работоспособности системы – **ограниченно работоспособное состояние**. Данное заключение показывает необходимость проведения комплекса мероприятий по модернизации действующей системы мониторинга инженерных конструкций для обеспечения требуемого уровня надежности всей системы.

8. Анализ факторов, влияющих на возникновения сбоев СМИК, показал, что сбои оборудования происходят по причине высокой температуры в летний период времени и зависят от направления ветрового потока. Также доказано, что корректное срабатывание СМИК вызвано динамическим откликом конструкции на ветровой поток, направленный под углом, близким к продольному направлению относительно моста. Такое явление происходит из-за возникновения турбулентного ветрового потока в районе отверстия в архитектурном элементе на вершине пилона. Стоит отметить, что возникающие колебания металлических частей на вершине пилона не влияют на несущую способность вантового моста.

9. Предложены практические рекомендации по содержанию СМИК в работоспособном состоянии и оценке технического состояния вантовых мостов, которые внедрены и используются для модернизации действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах платной автомобильной дороги общего пользования «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге эксплуатирующей организацией ООО «ОСА-Север».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Российской Федерации:

1. Категория К2

1.1. Махонько, А. А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько, А. В. Мальков, А. А. Белый, А. А. Антонюк // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 83–96. – DOI: 10.17816/transsyst20239283-96.

1.2 Махонько, 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. / А. А. Махонько, Ю. Г. Лазарев, А. А. Антонюк // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 421–431. – DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-421-431.

1.3 Махонько, 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 / А. А. Махонько, Ю. Г. Лазарев, А. А. Антонюк // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 585–597. – DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-585-597.

1.4 Махонько, 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 / А. А. Махонько, Ю. Г. Лазарев, А. А. Антонюк // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10, №. 3. – С. 401–418. – DOI: 10.17816/transsyst630992.

2. Категория КЗ

2.1. Махонько, А. А. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько, А. В. Мальков, А. А. Белый, А. А. Антонюк // Путевой навигатор. – 2023. – № 56(82). – С. 68–77.

2.2. Махонько, А. А. 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 / А. А. Махонько, Ю. Г. Лазарев // Путевой навигатор. – 2024. – № 59(85). – С. 66–73.