

УДК 004.942

Синтез рациональной конфигурации информационно - измерительной системы мониторинга эксплуатационного состояния сооружений

Авдулов Виталий Андреевич

avdulovva@student.bmstu.ru

Мещихин Илья Александрович

meschihin@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Сформулирована постановка задачи синтеза рациональной конфигурации информационно-измерительной системы, предназначенной для мониторинга эксплуатационного состояния сооружений на примере многопролетного моста. Обоснована актуальность данной задачи. Представлена концепция ее решения с рассмотрением метода расчета конструктивной схемы моста при различных базисных нагрузениях, построения матрицы откликов, а также алгоритма подбора эффективных точек установки измерительных датчиков. Сделаны выводы о применимости данного подхода. Представлены перспективы развития данной концепции системы.

Ключевые слова: конструкция, отклик, средства измерения, матрица откликов, эффективные точки, программа расчета

Введение. Мониторинг эксплуатационного состояния транспортных инфраструктурных объектов является одной из ключевых задач для обеспечения их надежности и безопасности. Многопролетные мосты, обладая сложной конструкцией и подвергаясь воздействию различных природных и эксплуатационных факторов, требуют постоянного контроля, чтобы своевременно выявлять возможные дефекты, предотвращать аварийные ситуации и прогнозировать остаточный ресурс конструкции.

Современные информационно-измерительные системы (далее — ИИС) позволяют автоматизировать процесс мониторинга, обеспечивая высокую точность и оперативность сбора данных о состоянии конструкции. Однако проектирование таких систем для сложных объектов представляет собой нетривиальную задачу, требующую учета множества факторов, таких как особенности конструкции, условия эксплуатации, экономическая целесообразность.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки рациональной конфигурации ИИС, которая обеспечивала бы комплексный мониторинг эксплуатационного состояния многопролетного моста с минимальными затратами.

Цель работы заключается в расчете и обосновании рациональной конфигурации ИИС мониторинга, которая обеспечит эффективный мониторинг эксплуатационного состояния многопролетного моста.

Задачи исследования:

– провести расчеты конструкции для каждого базисного нагружения;

- составить матрицу откликов на базисные нагружения;
- разработать программу для определения координат и количества эффективных точек для крепления датчиков.

Анализ существующих систем мониторинга. Исследование существующих систем мониторинга дает возможность выбрать оптимальные решения для разработки собственной ИИС, учитывая технические, эксплуатационные и экономические аспекты.

Для мониторинга мостов используются различные типы датчиков, каждый из которых имеет свои особенности:

- датчики деформации, измеряющие изменения размеров конструктивных элементов под нагрузкой;
- акселерометры, регистрирующие вибрационные характеристики моста;
- инклинометры, измеряющие углы наклона опор и пролетных строений;
- температурные датчики, отслеживающие температурные изменения, которые могут влиять на расширение или сжатие материалов;
- датчики нагрузки, измеряющие усилия в опорных элементах.

В системах мониторинга используются проводные или беспроводные способы передачи данных, от выбора которых зависит надежность и скорость работы системы.

Объект исследования. С целью демонстрации подхода определения характерных точек для установки датчиков в работе рассматривается многопролетный мост с колонными основаниями. Упрощенная 3D-модель многопролетного моста представлена на рис. 1.

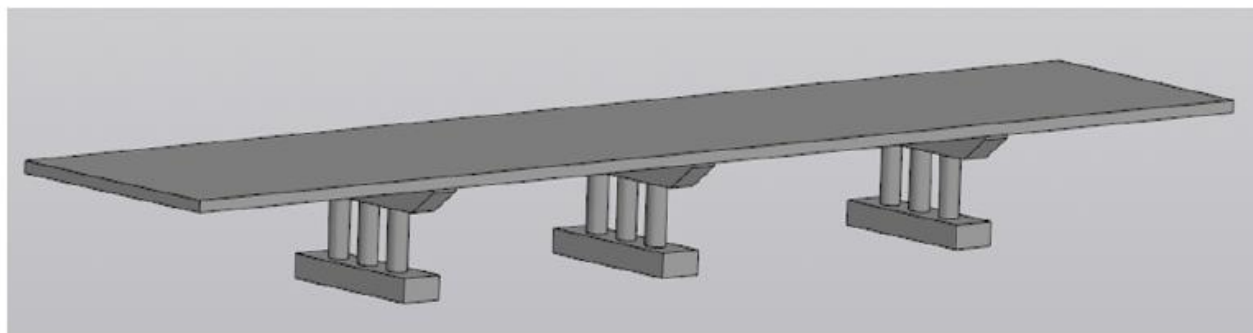


Рис. 1. Упрощенная 3D-модель многопролетного моста

Конструкция пролетов и опор моста выполнена из железобетона, обеспечивая устойчивость и долговечность. Каждый пролет имеет одинаковую длину. Опоры расположены равномерно вдоль длины моста и выполняют функцию распределения нагрузки от пролетных строений на фундамент.

В данной работе исследование сооружения проводится на выявление базовых откликов на воздействие силы тяжести и анализ ее собственных форм колебаний, причем конструкция эксплуатируется в условиях сочетания нагружений: статическая нагрузка и динамическая (колебания на собственных частотах). Использование этих характеристик, которые являются фунда-

ментальными и присутствуют для любой конструкции, позволяет сократить сложность начального этапа расчета рациональной конфигурации ИИС и сделать задание начальных условий более универсальным, исключив учет специфических и временных нагрузок (например, ветровых или транспортных). Собственные формы представляют собой внутренние свойства конструкции (распределение амплитуд колебаний на каждой собственной частоте) и определяют динамические свойства конструкции, что важно для диагностики потенциальных резонансных состояний.

Основная концепция. ИИС мониторинга эксплуатационного состояния сооружений представляет собой совокупность оптимальных по количеству средств измерений и программного кода, обеспечивающую непрерывный мониторинг конструкции в реальном времени. Алгоритм обеспечения мониторинга, приведенный на рис. 2, включает два основных этапа [1]:

- выбор параметров идентификации и проведение замеров соответствующих им обобщенных перемещений;
- определение по измеренным обобщенным перемещениям значений действующих на объект нагрузок и расчет напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) объекта по полномасштабной модели.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки НДС объекта мониторинга

В целях сокращения времени расчета используют переход от полномасштабной модели к редуцированной методом статической конденсации [2]. Редукция исходной системы линейных алгебраических уравнений существенно уменьшает число неизвестных и позволяет выбрать наиболее информативные параметры для последующего мониторинга объекта. Такие пара-

метры, которые характеризуют состояние объекта, называются параметрами идентификации [3]. Достоверность и качество информации об объекте, восстановленной по результатам измерений, зависит от выбора параметров идентификации, поэтому процедура рационального назначения параметров идентификации является одним из важных этапов.

Далее с использованием окончательно выбранного набора параметров идентификации вычисляются масштабные коэффициенты для нормированных нагрузок, входящих в состав контролируемого набора. Реальное значение нагрузки вычисляется путем умножения каждой нормированной нагрузки на соответствующий масштабный коэффициент.

С использованием редуцированной конечно-элементной моделью и матрицами восстановления на основе измеренных параметров идентификации восстанавливаются значения компонент тензора напряжений в наборе элементов, который характеризует НДС конструкции в целом.

Чтобы достичь поставленной цели при помощи инженерных подходов проводятся расчеты конструкции для каждого базисного нагружения. Данные проведенных расчетов позволяют проанализировать поведение конструкции, определить характер откликов и состав оборудования, и далее составить матрицу откликов конструкции. По матрице откликов, при помощи разработанного программного кода, сооружение исследуется на определение оптимального количества средств измерений и мест их установки. По данным датчиков, установленных в найденных характерных точках конструкции, восстанавливается НДС объекта и осуществляется постоянный мониторинг за его эксплуатационным состоянием (остаточным ресурсом).

Определение характера откликов конструкции и вида средств измерений. Для расчета рациональной конфигурации ИИС мониторинга эксплуатационного состояния многопролетного моста необходимо определить характер откликов на воздействия, которые в дальнейшем будут измеряться датчиками и определять НДС сооружения с целью предупреждения разрушений и остаточного ресурса. Одними из ключевых параметров, подлежащих мониторингу мостовых сооружений, являются перемещения и деформации.

Угловые перемещения фиксируют наклон и повороты элементов конструкции, что дает возможность зафиксировать и распознать изменения, связанные, например, с осадкой фундаментов, кренами опор или нарушением соединений между пролетами. Даже минимальные отклонения в углах наклона, измеренные инклинометрами, являются сигналом о возможных проблемах, что позволяет оперативно принимать меры по устранению проблем.

Выбор угловых перемещений в качестве ключевого параметра для мониторинга эксплуатационного состояния многопролетного моста обусловлен рядом существенных преимуществ по сравнению с линейными перемещениями и деформациями. Эти преимущества включают в себя простоту установки, эксплуатации и обслуживания измерительного оборудования, простоту интерпретации данных, экономическую эффективность и мониторинга состояния конструкции. Поэтому измерение угловых перемещений является

наиболее эффективным и надежным способом для своевременного выявления отклонений и обеспечения безопасности в процессе эксплуатации сооружения.

Составление матрицы откликов. Матрица откликов $[\delta]$ формируется по столбцам, где каждый ее столбец представлен в виде вектора в пространстве обобщенных перемещений. Это позволяет учитывать распределение откликов конструкции на заданные базисные нагружения. Компонента матрицы откликов δ_{ij} численно равна i -му обобщенному перемещению конструкции, вызванному действием j -го нагружения.

Процесс определения рационального взаимного расположения средств измерений в рамках построения ИИС мониторинга эксплуатационного состояния сооружения рассматривается как оптимизационная задача, целевой функцией в которой выступает детерминант матрицы откликов [4]. Максимизация определителя обеспечивает минимальную корреляцию между измеряемыми параметрами, что повышает чувствительность и точность измерений, а также повышает идентифицируемость параметров модели.

При небольшом количестве элементов модели и небольшой размерности пространства нагружений задачу поиска взаимного расположения средств измерений можно решать путем использования последовательного перебора всех возможных вариантов ее исполнения. Это позволяет проанализировать все комбинации размещения датчиков и выбрать конфигурацию, при которой достигается максимальный детерминант матрицы откликов. Однако данный подход становится вычислительно затратным при увеличении размерности задачи.

Для более сложных моделей с большим числом элементов и степеней свободы прибегают к использованию таких методов оптимизации, как генетические алгоритмы, методы на основе градиентного спуска и др. Эти методы позволяют значительно сокращать время поиска, сохраняя высокий уровень эффективности.

Получившаяся матрица откликов для упрощенной модели многопролетного моста, рассматриваемого в рамках данной работы, имеет размерность 65645×33 . В расчет были включены угловые перемещения по трем осям, вызванные силой тяжести, а также возможные угловые перемещения, связанные с десятью свободными формами колебаний конструкции.

Алгоритм программы расчета. Программа расчета рациональной конфигурации ИИС мониторинга эксплуатационного состояния многопролетного моста предназначена для обработки данных откликов, их последующего анализа с целью исследования геометрических свойств измерений и визуализации.

Исходные данные загружаются из Excel-файла, который содержит ранее составленную матрицу откликов. После загрузки данные должны быть проанализированы и при необходимости дополнены или доработаны для более детальной и эффективной работы программы. Далее необходимо определить метод нахождения оптимального решения, при котором детерминант матрицы откликов принимает максимальное значение.

В результате своей работы программа определяет номера узлов, по которым в дальнейшем можно узнать координаты характерных точек для установки средств измерений. После этого программа строит 3D-график, на котором отмечены все узлы исходного объекта и узлы, которые являются критическими точками.

Блок-схема алгоритма работы программы расчета представлена на рис. 3.

Результаты исследования. Апробация результатов исследования заключается в проверке работы разработанной программы расчета рациональной конфигурации ИИС мониторинга эксплуатационного состояния многопролетного моста. Проверка заключается в оценке адекватности расположения рассчитанных точек установки датчиков по их графическому отображению на изображаемой программой модели многопролетного моста.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы программы расчета рациональной конфигурации ИИС мониторинга

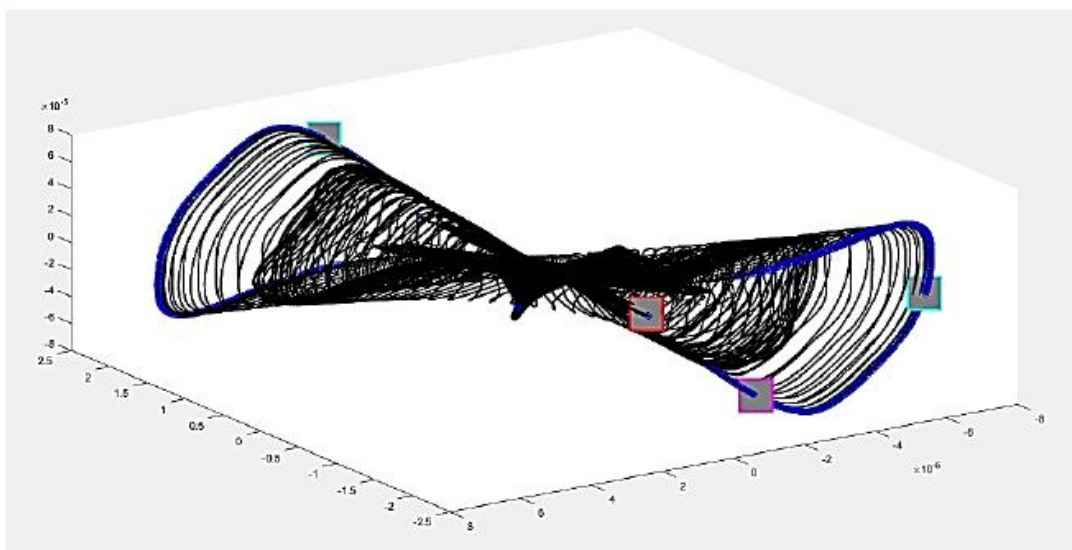


Рис. 4. Визуализация построенной выпуклой оболочки

На рис. 4 изображена визуализация данных матрицы откликов в трехмерном пространстве с отмеченными расчетными эффективными точками.

Черным цветом на графике изображены все точки матрицы откликов. Синим цветом отображаются точки, которые являются вершинами выпуклой оболочки. Маркерами с разноцветными границами изображены рассчитанные эффективные точки, в которые следует устанавливать датчики, при этом эти точки расположены на выпуклой оболочке.

На рис. 5 изображено построение трехмерного графика, который с помощью координат узлов сетки визуализирует 3D-модель конструкции многопролетного моста с выделением маркерами рассчитанных ранее точек установки датчиков.

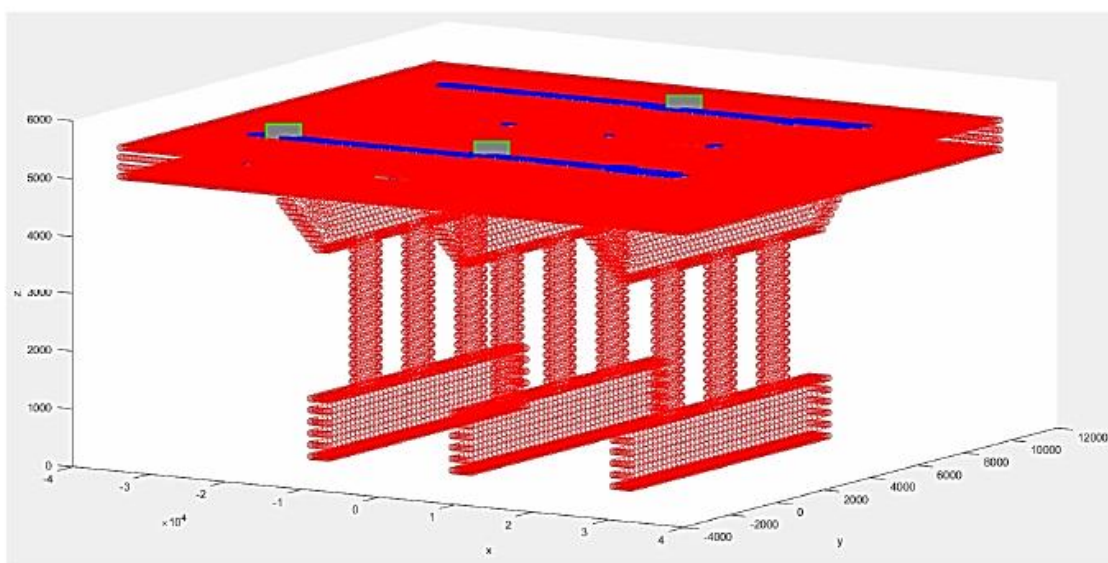


Рис. 5. Визуализация 3D-модели объекта с выделенными расчетными точками установки датчиков

Маркерами зеленого цвета выделены рассчитанные эффективные точки, а синим цветом — точки, принадлежащие выпуклой оболочке и из которых выбирались эти эффективные точки.

Апробация работы программы подтвердила корректность ее работы и значимость для дальнейшего хода разработки ИИС мониторинга эксплуатационного состояния сооружения в части восстановления НДС конструкции по значениям откликов в рассчитанных точках [5, 6].

Заключение. В ходе проведения исследования были получены следующие результаты и выводы:

- определен характер откликов конструкции, которые будут измеряться ИИС мониторинга, и выбран вид технического средства их измерения;

- проведены расчеты конструкции для каждого базисного нагружения, по результатам которого была составлена матрица откликов для дальнейшего расчета;

- разработана программа расчета эффективных точек установки датчиков измерения откликов конструкции, проведена апробация работы программы.

Таким образом, в работе был изложен подход, благодаря которому рассчитана рациональная конфигурация ИИС мониторинга, которая обеспечит эффективный мониторинг эксплуатационного состояния многопролетного моста с минимальными затратами.

Перспективой развития ИИС выступает разработка программного обеспечения системы, которое позволит восстановить НДС конструкции по значениям откликов в рассчитанных точках, а также прогнозировать остаточный ресурс конструкции по истории ее нагружения.

Литература

- [1] Гусев Н.Н. *Методология создания и эксплуатации информационной системы мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений*. Дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2008, 185 с.
- [2] Мещихин И.А., Сахненко М.А., Сосенушкин Е.Н. Применение метода внешних суперэлементов и ОТМ-матриц при мониторинге состояний шлюзовых затворов. *Речной транспорт (XXI век)*, 2013, № 5, с. 52–55.
- [3] Мещихин И.А., Гаврюшин С.С., Зайцев Е.А. Мониторинг технических конструкций на основе редуцированных конечно-элементных моделей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 9, с. 10–18.
- [4] Мещихин И.А., Гаврюшин С.С. Метод огибающих в задаче выбора рационального состава средств измерений. *Измерительная техника*, 2021, № 2, с. 68–72.
- [5] Мещихин И.А., Гаврюшин С.С. Критерии качества и алгоритм выбора редуцированных моделей для мониторинга технических конструкций. *Математическое моделирование и численные методы*, 2016, № 4 (12), с. 103–121.
- [6] Мещихин И.А. *Методика рационального построения информационно-измерительной системы оценки нагруженного состояния сложных технических объектов*. Дис.... канд. техн. наук. Москва, 2020, 204 с.

Synthesis of a rational configuration of an information - measuring system for monitoring the operational condition of constructions

Avdulov Vitaliy Andreevich

avdulovva@student.bmstu.ru

Meshchikhin Ilya Alexandrovich

meschihin@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

This paper formulates the problem of synthesizing a rational configuration for an information and measurement system designed to monitor the operational condition of structures using a multi-span bridge as an example. The relevance of this problem is substantiated. A solution concept is presented, including a method for calculating the bridge's structural design under various base loads, constructing a response matrix, and an algorithm for selecting effective sensor installation locations. Conclusions are drawn regarding the applicability of this approach. Prospects for further development of this system concept are presented.

Keywords: construction, response, measuring instruments, response matrix, “good” points, calculation program