

ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ОБЪЕКТЫ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ

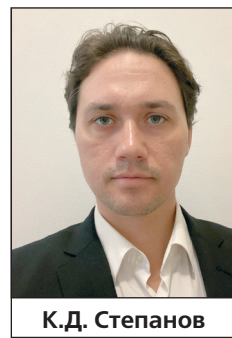
Рассмотрены вопросы разработки алгоритмического и программного обеспечения для автоматизированной оценки вибрационных воздействий транспортных потоков на инфраструктурные объекты, выполняемой на основе имитационного моделирования и экспертных знаний. Охарактеризованы особенности представления и интеграции данных натурных измерений вибраций на примере вибронагрузок, создаваемых движением поездов метрополитена.

Ключевые слова: вибрационные воздействия, транспортные потоки, моделирование, автоматизированная система, мониторинг

EDN: NANBQA



О.В. Дружинина



К.Д. Степанов

Развитие городов неизбежно связано с увеличением транспортных потоков, что приводит к росту вибрационных нагрузок на окружающие здания и сооружения [1;2]. В настоящее время разработан и применяется целый ряд нормативных документов, связанных с теми или иными аспектами вибрационных воздействий [3;4]. Вибрации, возникающие в результате движения наземного, железнодорожного и воздушного транспорта, распространяются по различным средам, включая грунт, инженерные коммуникации и строительные конструкции. Их воздействие со временем накапливается и может привести к серьезным последствиям, начиная от появления трещин в стенах зданий и заканчивая снижением эксплуатационной надежности объектов инфраструктуры.

Транспортные вибрации оказывают существенное влияние на состояние зданий и сооружений, что подтверждается многочисленными исследованиями [5–7]. Одним из наиболее распространенных источников вибрационных нагрузок является метрополитен. Вибрации, передающиеся через грунт и конструкции, создают дополнительные динамические нагрузки на здания, расположенные вблизи линий метрополитена.

На рис. 1 приведен пример, иллюстрирующий строительство новой линии метрополитена в существующей плотной застройке.

Железнодорожный транспорт также оказывает значительное вибрационное воздействие. Поезда, движущиеся по рельсовым путям, генерируют волны,

Дружинина Ольга Валентиновна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теория устойчивости и математическое моделирование динамических систем, теория управления техническими системами, интеллектуальный анализ данных, совершенствование автоматизированных систем мониторинга и диагностики транспортных систем. Автор более 350 научных работ.

Степанов Константин Дмитриевич, соискатель кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: управление строительными проектами, математическое моделирование, совершенствование автоматизированных систем мониторинга и диагностики транспортных систем. Автор 12 научных работ.



Рис. 1. Пример строительства линии метрополитена в существующей плотной застройке

которые распространяются по грунту и могут достигать зданий, находящихся в радиусе нескольких десятков метров. Долговременные наблюдения показывают, что в районах, прилегающих к железнодорожным путям, частота появления повреждений в зданиях выше, чем в более удаленных районах.

Наибольшую опасность представляют транспортные вибрации в густонаселенных районах, особенно вблизи станций метрополитена, железнодорожных магистралей и крупных автомобильных дорог. Дома, расположенные в этих зонах, испытывают повышенные динамические нагрузки, что приводит к ускоренному старению материалов и появлению структурных повреждений. Особенно уязвимыми являются исторические здания, которые изначально не были рассчитаны на такие нагрузки. В связи с этим возникает необходимость разработки современных цифровых инструментов, способных анализировать и прогнозировать вибрационные воздействия.

Существующие методы оценки вибрационных воздействий часто сосредоточены на локальных характеристиках и недостаточно учитывают сложные пространственные взаимодействия объектов инфраструктуры. Это приводит к снижению точности расчетов и прогнозов, особенно на стадии проектирования новых объектов или реконструкции существующих. Современные подходы требуют использования интегративных инструментов, способных моделировать и анализировать распространение вибраций с учетом характеристик среды и конструкций, что позволит повысить точность оценки и снизить риски.

В связи с этим актуальным направлением исследований является разработка цифровых инструментов для моделирования вибрационных воздействий. Такие инструменты должны обеспечивать: возможность прогнозирования воздействия вибраций на объекты инфраструктуры еще на стадии проектирования; учет сложных взаимодействий между элементами среды; применение современных методов анализа, таких как графовые модели и искусственный интеллект; высокую производительность и универсальность программного обеспечения для адаптации к различным сценариям и объектам.

Современные программные решения, которые можно использовать в рамках автоматизированных систем анализа вибрационных воздействий, можно условно разделить на три категории: специализированные коммерческие продукты, математические инструменты общего назначения и открытые платформы для научных исследований. Соответственно элементы каждой из указанных категорий обладают как преимуществами, так и ограничениями, что создает предпосылки для разработки новых, обладающих более удобным инструментарием и более производительных решений.

Наиболее известные коммерческие программные комплексы, такие как ANSYS и COMSOL Multiphysics, могут применяться для анализа вибрационных воздействий. Эти решения обладают инструментами для моделирования физико-механических процессов, включая распространение вибраций через грунты и конструктивные элементы зданий. Однако их высокая стоимость и сложность использования огра-

ничивают доступность для образовательных учреждений и небольших инженерных компаний. Кроме того, большинство из них не поддерживают адаптивное моделирование сложных систем взаимодействия нескольких объектов, что снижает их применимость в условиях городской застройки.

В число математических инструментов общего назначения входит часто используемый для построения математических моделей язык программирования высокого уровня Python с библиотеками для научных вычислений, такими как SciPy и NumPy [8;9]. Эти инструменты доступны и популярны, но возможности в интеграции методов графового моделирования и нечеткой логики требуют значительных усилий для создания кастомных решений. Кроме того, скорость выполнения операций на больших графах уступает специализированным языкам, таким как Julia [10;11], что особенно критично для анализа сложных систем в реальном времени.

Среди открытых платформ можно выделить OpenFOAM и FreeFEM, которые предоставляют широкий функционал для численного моделирования. Они позволяют реализовывать нестандартные алгоритмы и масштабируемые модели, но их использование требует глубоких знаний в области программирования и численных методов. Кроме того, большинство из этих решений не поддерживает визуализацию сложных графовых структур, что затрудняет анализ результатов.

Разработка инструментального обеспечения на языке Julia имеет ряд преимуществ. Она интегрирует графовое моделирование и методы нечеткой логики, что позволяет учитывать сложные взаимодействия объектов и проводить качественную оценку их состояния. Высокая производительность обеспечивается использованием языка программирования Julia и LLVM-компилятора, благодаря чему скорость выполнения операций сопоставима с высокопроизводительными библиотеками на C++. Кроме того, разработанное с применением Julia программное обеспечение отличается универсальностью и доступностью, легко адаптируется к различным сценариям использования и не требует значительных затрат на внедрение.

В рамках настоящей работы рассматриваются вопросы, связанные с разработкой инструментально-методического обеспечения, которое направлено на получение автоматизированной оценки вибронагрузок от поездов метрополитена на инфраструктурные объекты без привлечения численных методов, обычно используемых для расчета распространения вибраций, но с учетом построения гибридных моделей, основанных на графовом описании среды распространения вибраций. Математическое обеспечение для реализации предлагаемого подхода к оценке вибронагрузок

описано в [12;13], а базовый элемент программного обеспечения представлен в [14].

В рассматриваемом случае этапы имитационного моделирования включают в себя: формирование графовой модели взаимодействий, задание входных параметров и начальных условий, расчет параметров вибрации, визуализация результатов. На этапе формирования графовой модели взаимодействий выполняется задание узлов и ребер графа на основе данных о структуре городской инфраструктуры (здания, грунты, оборудование), а также определяются характеристики каждого объекта, включая материал, возраст и вибрационную чувствительность.

Далее следует этап задания начальных условий, который включает определение параметров источников вибрации, таких как частота, амплитуда и длительность воздействия, а также учет временных задержек в передаче вибрации между объектами. В процессе расчета параметров вибрации для каждого узла вычисляются амплитуда и частота колебаний с учетом передаточных характеристик ребер, при этом параметры обновляются итеративно в течение заданного временного интервала. Расчеты выполняются с использованием данных о материалах конструкций, их возрасте, геометрии, а также с учетом характеристик среды. Завершающим этапом является визуализация результатов, включающая построение графиков динамики вибрации и генерацию графовой структуры взаимодействий, что позволяет выявить наиболее уязвимые зоны.

Архитектура графового метода представляет собой один из ключевых подходов для моделирования пространственных взаимодействий объектов инфраструктуры. В данной модели городская инфраструктура описывается в виде графа, где узлы представляют отдельные объекты (здания, грунт, источники вибрации), а ребра отображают связь между ними, характеризующую передачу вибрационных воздействий.

Основными элементами графовой модели являются узлы и ребра взаимодействия. Источник вибрации генерирует вибрационные колебания. Отражатель изменяет фазу сигнала, инвертируя его на 180 градусов. Поглотитель рассеивает часть энергии вибрации, не изменяя ее частотные и фазовые характеристики. Резонатор аккумулирует и усиливает вибрационное воздействие на соседние узлы. Терминатор представляет собой конечный узел, фиксирующий источник вибрационного воздействия. На рис. 2 представлен пример архитектуры графовой модели.

Таким образом, построение графовой модели происходит в три этапа: идентификация объектов инфраструктуры, определение взаимодействий, построение графа. На этапе идентификации определяются ключевые

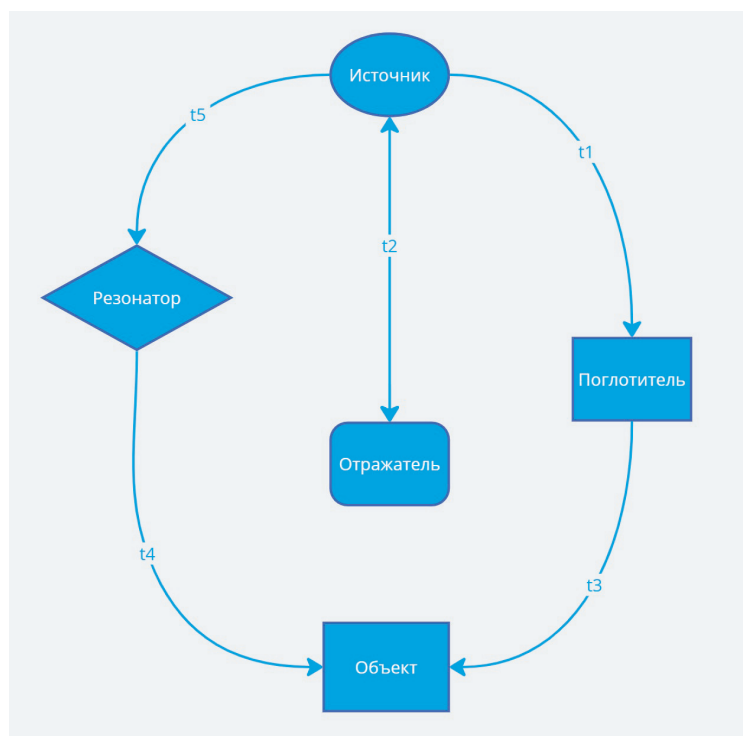


Рис. 2. Пример архитектуры графовой модели пространственных взаимодействий для оценки вибрационных воздействий

чевые элементы среды, подверженные вибрации, и задаются их характеристики.

Следующим этапом устанавливаются связи между узлами на основе их физического взаимодействия, вводятся параметры ребер, такие как коэффициенты передачи вибрации. На последнем этапе формируется граф, где узлы соединены ребрами с учетом топологии среды и взаимного расположения объектов. Используется матрица связности для упрощения расчетов.

Примеры параметров, используемых для построения графовой модели пространственных взаимодействий, приведены в табл. 1.

Преимущества применяемого метода, базирующегося на дискретном анализе и на имитационном моделировании, заключается в возможности масштабирования модели за счет добавления новых узлов и типов ребер, а также в возможности учета различных характеристик объектов, таких как виброакустический комфорт, прочностные параметры, демпфирующие свойства. Возможность интерактивного построения графов взаимодействий в зонах повышенной вибрации позволяет идентифицировать зоны с максимальной вибрационной нагрузкой. Этот метод имеет универсальный характер и подходит для анализа различных инфраструктурных сред, от жилых районов до промышленных зон.

Разработанные алгоритмы позволяют интерпретировать данные о вибрациях с применением правил нечеткой логики. Заключение формулируется с помощью качественной шкалы вибронегруженности сооружения (плохое, угрожаемое и хорошее состояние). В каждом узле графа предусмотрена реализация системы нечеткого вывода для оценки изменения таких параметров, как виброускорение и вибронегруженность сооружения соответственно.

Назначение разрабатываемой экспертной базы на основе нечеткой логики состоит в оценке состояния объектов инфраструктуры при воздействии вибрации. В рамках системы нечеткого вывода анализируются параметры с неопределенными или размытыми границами, такими как возраст конструкции, материал, амплитуда вибрации, и классифицируются состояния объектов по качественным категориям: «хорошее», «угрожаемое», «плохое». В рамках создания алгоритмического обеспечения используется нечеткий вывод Мамдани с учетом лингвистических переменных, правил вывода и механизмов интерпретации.

Созданный на основе нормативной документации и экспертных знаний набор базовых правил нечеткого вывода используется для оценки состояния объектов. Влияние амплитуды и возраста конструкции проявляется следующим образом: если амплитуда вибрации низкая, а возраст конструкции молодой, объект

Таблица 1

Параметры ключевых элементов графовой модели

Параметр	Описание	Диапазон значений
Амплитуда вибрации	Интенсивность колебаний	0–100 мм/с
Частота вибрации	Количество колебаний в секунду	1–200 Гц
Коэффициент затухания	Степень уменьшения амплитуды	0,1–1,0
Материал конструкции	Тип материала объекта	Дерево, металл, бетон
Возраст конструкции	Время с момента постройки объекта	0–100 лет
Временная задержка	Время передачи колебания между узлами	0,1–10 с
Состояние объекта	Оценка на основе нечеткой логики	Хорошее, угрожаемое, плохое

находится в хорошем состоянии. В случае высокой амплитуды и старого возраста конструкции его состояние оценивается как плохое. Материал конструкции также играет важную роль. Когда объект выполнен из бетона, а амплитуда вибрации средняя, его состояние считается угрожающим. Если конструкция деревянная и амплитуда вибрации высокая, объект находится в плохом состоянии. При сочетании нескольких характеристик учитываются материал, возраст и амплитуда вибрации. Например, если конструкция металлическая, имеет средний возраст и низкую амплитуду вибрации, ее состояние оценивается как хорошее. Если материал конструкции дерево, возраст старый, а амплитуда средняя, объект находится в угрожающем состоянии. Таким образом, использование правил нечеткой логики позволяет учитывать неопределенность и вариативность характеристик объектов при воздействии вибрации.

В рамках разработки системы для автоматизированной оценки вибронагрузок от транспортных средств учитывались примеры и полученные характеристики в ходе натурных испытаний (с учетом фактических уровней виброускорений и колебаний грунта), проводящихся в непосредственной близости от источника вибрации - действующих тоннелей метрополитена. При проведении измерений вибрации учитывается использование трехосевого акселерометра, регистрирующего среднеквадратичное ускорение в двадцати точках.

На момент проведения измерений на экспериментальном участке находились существующие здания, в которых также выполнялись замеры для определения коэффициентов передачи. Измерения проводились синхронно в нескольких точках по трем направлениям. Регистрировалось среднеквадратичное ускорение сигнала с интервалом интегрирования 1 с. Продолжительность измерений составляла до 15

минут, за это время фиксировалось не менее 10 проходов поездов метро.

На основе полученных спектрограмм виброускорений в момент движения поездов метрополитена под измерительной точкой сформированы характеристики, типичные для данного типа динамического воздействия. Вибрационные колебания, вызванные движением поездов метрополитена, длятся от 10 до 15 секунд, достигая наибольших амплитуд в октавных полосах со среднегеометрической частотой 31,5–125 Гц. Уровень колебаний грунта во время проезда поездов составляет 80–85 дБ, в то время как фоновый уровень в среднем на 25–30 дБ ниже.

На каждой выбранной точке наблюдения зафиксировано количество проездов метropоездов, варьирующееся от 8 до 15 раз за время измерений. Пример систематизации данных по уровням виброускорения представлен в табл. 2. В этой таблице, в частности, указаны наибольшие среднеквадратичные значения виброускорений, выявленные на поверхности грунта для каждой измеренной точки в течение всех наблюдений прохода поездов. При анализе использовалось секундное усреднение зарегистрированных данных.

Данные натурных измерений играют ключевую роль в формировании входных данных расчетного комплекса, обеспечивая его высокую точность и адаптивность к реальным условиям городской среды. Измеренные значения виброускорений позволяют калибровать параметры модели источников вибрации, корректируя амплитуду, частоту и характеристики затухания. Коэффициенты передачи вибраций, зафиксированные в разных средах, интегрируются в алгоритмы расчетов для обеспечения соответствия модели реальным условиям. Входные данные в ряде случаев следует подвергнуть предобработке, например, выявить аномалии в наборах данных, с применением методов интеллектуального анализа данных,

Таблица 2

Максимальные среднеквадратические уровни вибраций в точках измерения

Точка	Расстояние до источника в плане, м	Максимальные уровни виброускорений в точках измерений, Дб						
		2 Гц	4 Гц	8 Гц	16 Гц	31,5 Гц	63 Гц	125 Гц
1	37	—	58	61,1	79,1	81,9	67,6	—
2	25	—	60	66,5	78,4	82	75,5	—
3	37	—	58	66,7	78,6	81,5	68,5	—
4	5	—	60	72	91	90	82	—
5	7	—	60	66,8	91,2	90	84	—
6	37	—	60	66	79	83,9	75	—
7	21	—	60	66,4	90,8	90,3	83,3	—
8	37	—	60	66,5	78,4	82	75,5	—
9	5,5	—	56	68,7	87,9	90,7	84,5	—
10	8	—	61	69,3	85,7	89,8	82,5	—
11	25	—	58	66,5	78,4	82	75,5	—
12	25	—	58	66,5	78,4	82	75,5	—
13	21	—	60	70	91,2	90,1	80	—
14	34	—	60	67	80	84,9	76	—
15	33	—	60	66	79	83,9	75	—
16	87	—	60	67,1	81,5	80,7	66,7	—
17	91	—	60	68,6	80,1	81,7	67,7	—
18	70	—	58	65,1	80,9	79	62,9	—
19	70	—	58	64,9	80,5	78,5	62,5	—
20	113	—	60	66,7	79,5	75,5	61,8	—
Максимум:		—	61	72	91,2	90,7	84,5	—

например, с использованием нейросетевого моделирования [15;16].

На основе натурных данных выполняется расчет распространения вибрационных воздействий, что позволяет определить зоны наибольшего влияния с учетом геометрии застройки, расстояния до источника вибрации и состава грунта. В ходе моделирования учитываются динамические изменения среды, а также возможные вариации характеристик объектов, расположенных вблизи источников вибрации.

Валидация расчетных данных осуществляется путем сравнения прогнозируемых значений с фактическими результатами измерений, что дает возможность уточнить параметры модели и минимизировать расхождения. Такой подход позволяет адаптировать расчетный комплекс к различным типам городской инфраструктуры, учитывая конструктивные особенности зданий, плотность застройки и характер транспортных потоков.

Использование натурных данных также позволяет проводить оптимизацию виброизоляционных решений. Анализируя зоны с повышенным уровнем вибрационного воздействия, можно определить наиболее эффективные методы его снижения, включая упругие опоры, демпфирующие покрытия и антирезонансные конструкции. В расчетном комплексе моделируются сценарии с применением различных виброизоляционных технологий, что позволяет предварительно оценить их эффективность.

Прогнозирование вибрационного воздействия на новые объекты также базируется на натурных данных, позволяя адаптировать модель к конкретным условиям городской среды. Это дает возможность разрабатывать рекомендации по снижению вибрационной нагрузки уже на стадии проектирования, что особенно важно для планирования жилых, коммерческих и общественных зданий вблизи транспортных магистралей.

В основе алгоритмов разрабатываемого программного комплекса VibCalc для автоматизированной оценки вибронагрузок от транспортных средств лежат методы дискретного анализа, имитационного моделирования и нечеткой логики. Указанное инструментальное обеспечение направлено на формализацию схемы взаимодействия объектов при вибрационных возмущениях и на реализацию возможности оценивания вибрационных воздействий с учетом выбранной качественной шкалы.

Для разработки VibCalc выбран язык программирования Julia, который представляет собой высокоуровневый интерпретируемый язык программирования с динамической типизацией, который был создан специально для научных вычислений. Одним из ключевых принципов данного языка является обеспечение высокой производительности программного обеспечения. Как отмечается ведущими разработчиками, скорость выполнения операций с применением языка Julia сравнима с наиболее высокопроизводительными математическими пакетами и языками программирования.

Комплекс VibCalc, реализуемый с помощью Julia, предназначен для моделирования пространственного

взаимодействия объектов инфраструктуры в условиях повышенного вибрационного воздействия. В рамках комплекса предусматривается построение гибридных математических моделей, основанных на графовом описании среды распространения вибраций, принципы которого изложены в настоящей статье. Программный комплекс позволяет масштабировать библиотеку объектов, добавляя новые типы компонентов с учетом специфики изучаемой среды.

Основные компоненты инструментально-методического обеспечения автоматизированной оценки вибрационных воздействий транспортных средств на инфраструктурные объекты представлены на рис. 3. Эти компоненты соответствуют основным блокам программного комплекса. В каждом блоке учитываются охарактеризованные в настоящей статье особенности построения и функционирования моделей пространственных взаимодействий элементов транспортной и строительной инфраструктур в зонах повышенной вибрации.

В рамках имитационного моделирования вибрационных воздействий алгоритмы рассчитывают параметры вибраций для каждого узла графа, включая частоту и амплитуду. Расчеты производятся для задан-



Рис. 3. Основные компоненты инструментально-методического обеспечения автоматизированной оценки вибрационных воздействий транспортных средств на инфраструктурные объекты

ного временного диапазона, что позволяет анализировать динамику вибрационных нагрузок. Выполняется интерпретация данных о вибрациях с применением правил нечеткой логики. С учетом возможностей визуализации осуществляется интерактивное построение графа взаимодействий, а также построение графиков виброускорений для каждого узла в зависимости от времени и частоты. Функционирование диагностического компонента приводит к получению автоматизированного заключения о степени вибрационного воздействия на объект и при необходимости к получению автоматизированного заключения об улучшении виброизоляции. К особенностям программного обеспечения относятся гибкость рассматриваемых моделей, компактность, производительность, масштабируемость, поддержка существующих стандартов.

Формализованная реализация взаимодействий между узлами графовых моделей допускает использование различных математических конструкций с дискретной и непрерывной структурой. Например, возможно использование систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Программное обеспечение может быть использовано для выработки рекомендаций по улучшению виброизоляции и повышению запаса прочности конструкций в дополнение к автоматизированным системам, используемым в проектировании и строительстве.

В данной работе представлен ряд результатов разработки инструментально-методического обеспечения автоматизированной системы для моделирования и анализа вибрационного воздействия на объекты городской инфраструктуры. Проанализированы возможности представления и анализа данных натурных измерений виброускорений с учетом того, что интеграция результатов натурных измерений позволит повысить точность моделирования вибродействия объектов.

Перспективой исследований является расширение функционала программного комплекса для автоматизированной оценки вибронагрузок, создаваемых транспортными средствами. В частности, актуальным направлением является интеграция с системами мониторинга в реальном времени, что позволит оперативно реагировать на изменения в городской среде и повышать безопасность транспортной инфраструктуры. Кроме того, учет дополнительных конструктивных параметров зданий, таких как наличие микрповреждений и особенности материалов, позволит повысить точность оценки их состояния и разработать более эффективные меры виброизоляции, необходимые для устойчивого развития городского транспорта. 

Литература

1. Цукерников, И. Е. Измерения и анализ вибрации, вызванной движением поездов метрополитена на близлежащие здания, и разработка мероприятий по их снижению / И. Е. Цукерников, В. А. Смирнов. - Текст: непосредственный // Ученые записки физического факультета Московского университета. - 2017. - № 5. - С. 1751416. - EDN YPDDDC.
2. Райлян, Д. А. Прогноз уровней вибрационного воздействия и структурного шума при реконструкции станции Лобня МЖД-1 / Д. А. Райлян, В. И. Апатцев, Д. В. Климова. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2022. - № 2. - С. 83-91. - EDN: QTEUAR.
3. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования = Vibration and shock. Measurement and evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1. General requirements : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2007 г. № 357-ст. : введен впервые : дата введения 2008-07-01 : разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» на основе собственного аутентичного перевода стандарта, указанного в пункте 4. - Москва : Стандартинформ, 2008. - 53 с. - Текст : непосредственный.
4. СП 465.1325800.2019. Свод правил. Здания и сооружения. Защита от вибрации метрополитена. Правила проектирования : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 2 декабря 2019 г. № 756/пр.: введен 03.06.2019. - Москва : Стандартинформ, 2020. - 45 с. - Текст : непосредственный.
5. Дашевский, М. А. Концепция виброзащиты зданий и сооружений в поле строительных нормативов РФ / М. А. Дашевский, В. Л. Мондрус, В. В. Моторин. - Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. - 2018. - № 4. - С. 109-115. - EDN: SRBZAD.

6. Прогнозирование вибрации рельсового транспорта в помещениях жилых и общественных зданий / И. Е. Цукерников, И. Л. Шубин, Т. О. Невенчанная, Л. А. Тихомиров. - Текст : непосредственный // Noise Theory and Practice. - 2023. - Т. 9. № 2 (33). - С. 82-93. - EDN: BJHSWZ.
7. Численный анализ вибрационного воздействия метрополитена на многоэтажное здание / Л. Г. Пастухова, В. Н. Алехин, А. А. Антипин [и др.]. - Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. - 2016. - № 4 (31). - С. 72-78. - EDN: XHTQPJ.
8. McKinney W. Python for data analysis, 2e: data wrangling with Pandas, Numpy, and Ipython. Boston: O Reilly, 2017.
9. Fuhner C, Solem J.E., Verdier O. Scientific computing with Python 3. Packt Publishing, 2016.
10. Масина, О. Н. Использование высокоуровневых языков программирования для решения задач моделирования : учебное пособие / О. Н. Масина, А. А. Петров, О. В. Дружинина. - Елец : ЕГУ им. И. А. Бунина, 2023. - 98 с. - ISBN 978-5-00151-382-7. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/393302> (дата обращения: 03.06.2025). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
11. Bezanson J., Edelman A., Karpinski S., Shah V. B. Julia: A fresh approach to numerical computing // SIAM Review. 2017. V. 59. No. 1. P. 65-98.
12. Степанов, К. Д. Разработка алгоритмического обеспечения для оценки влияния вибрационных воздействий транспортных средств на объекты городской инфраструктуры / К. Д. Степанов, О. В. Дружинина. - Текст : непосредственный // Нелинейный мир. - 2023. - Т. 21, № 4. - С. 46-54. - EDN: TVTFHU.
13. Степанов, К. Д. Анализ моделей и разработка программного комплекса для оценки влияния вибрационных воздействий транспортных средств на объекты городской инфраструктуры / К. Д. Степанов, О. В. Дружинина, А. А. Петров. - Текст : непосредственный // Нелинейный мир. - 2024. - Т. 22. № 1. - С. 5-14. - EDN: PHKINW.
14. Программа для ЭВМ «Программа для моделирования пространственных взаимодействий инфраструктурных объектов в зонах повышенной вибрации». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611332 от 17.01.2025 г./ Петров А. А., Степанов К. Д., Дружинина О. В. - Текст : непосредственный.
15. Хайкин, Саймон. Нейронные сети : полный курс : перевод с английского / Саймон Хайкин. - изд. 2-е, испр. - Москва ; Санкт-Петербург : Диалектика, 2019. - 1103 с. - Текст : непосредственный.
16. Сивицкий, Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / Д. А. Сивицкий. - Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. - 2021. - № 2 (57). - С. 33-41. - EDN EPTXTN.