

УДК: 62-752.2:004.8

OECD: 2.03.PU

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.38.70.003

Обзор физических моделей вязкоупругих демпферов и перспективы применения искусственного интеллекта при их проектировании

Артеменко Д.Е.

Магистрант

Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика»,
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассматриваются современные представления о демпфирующих устройствах, основанных на применении вязкоупругих материалов, а также анализ и возможности применения методов искусственного интеллекта для подбора их параметров в процессе их проектирования. Рассмотрены основные типы демпферов по механизмам рассеяния энергии (вязкий, гистерезисный, конструкционный, фрикционный), приведена их классификация по методу управления и ключевым техническим характеристикам. Основное внимание уделено математическим моделям вязкоупругих материалов – от простейших моделей Максвелла, Кельвина-Фойгта, Пойнтинга-Томсона, до обобщённых и моделей с дробными производными. Показаны ограничения традиционных подходов, вызванные вычислительной трудоёмкостью и сложностью идентификации параметров нелинейных моделей. Предложена двухэтапная методика использования искусственного интеллекта, основанная на применении сверточных нейронных сетей для подбора материала и физически-информированных нейронных сетей для идентификации параметров, и синтеза структуры модели демпфера. Обозначены основные проблемы, заключающиеся в недостаточном количестве и качестве датасетов, «разрыве реальности», сложности обучения физически-информированных нейронных сетей и интерпретируемости результатов, а также предложены возможные пути их решения.

Ключевые слова: вязкоупругий демпфер, модель Пойнтинга-Томсона, искусственный интеллект, физически-информированные нейронные сети (PINN), идентификация параметров

Review of physical models of viscoelastic dampers and prospects for the application of Artificial Intelligence in their design

*Artemenko D.E.**Master's student*

*Department of Technosphere Safety and Computational Mechanics,
Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

Abstract

The article discusses modern concepts of viscoelastic damping devices and the analysis of possibilities for using artificial intelligence methods to select their parameters in the process of their design. The main

types of dampers by energy dissipation mechanisms (viscous, hysteresis, structural, friction) are considered, their classification by control methods and key technical characteristics are given. The focus is on mathematical models of viscoelastic materials – from the simplest models of Maxwell, Kelvin-Voigt, Poynting-Thompson, to generalized and models with fractional derivatives. The limitations of traditional methods caused by the difficulty of identifying the parameters of computational and nonlinear models are shown. Proposed a two-stage methodology for using artificial intelligence, based on the use of convolutional neural networks for selecting material and physically-informed neural networks for identifying parameters and synthesizing the structure of the damper model. The main problems are identified in the insufficient number and quality of datasets, “reality gap”, the complexity of learning physically informed neural networks and the interpretability of results, as well as possible ways to solve them.

Keywords: viscoelastic damper, Poynting-Thomson model, artificial intelligence, physics-informed neural networks (PINN), parameter identification

Введение

Борьба с вибрацией и ее контроль, начиная от проектирования и заканчивая эксплуатацией, являются важнейшими элементами, способствующими снижению чрезмерных амплитуд колебаний, подавления нежелательных резонансов и предотвращения преждевременного усталостного разрушения ответственных конструкций и их элементов. Использование той или иной формы предотвращения и контроля вибраций в большинстве вновь проектируемых конструкций становится обычной практикой для удовлетворения растущих потребностей при создании разнообразных сооружений. С использованием таких систем могут быть выполнены строгие ограничения, налагаемые на современные конструкции, чтобы обеспечить их эффективную работу в качестве эффективных и стабильных платформ для производства, связи, наблюдения и транспортировки.

Одним из типов борьбы с нежелательными колебаниями является вибродемпфирование. Это способ защиты от вибрации, основанный на необратимом переходе механической колебательной энергии в тепловую энергию за счёт внутреннего трения в материале или сил сопротивления в специальных устройствах. В рамках данной работы будет подробнее рассматриваться именно этот способ предотвращения нежелательных вибраций.

1 Классификация и технические характеристики демпфирующих устройств

1.1 Типы демпферов

Существуют различные подходы к борьбе с вибрацией с использованием разнообразных устройств, конструктивных схем, демпфирующих материалов, законов активного управления, приводов и датчиков. На сегодняшний день в отечественной и зарубежной практике сложились похожие по форме подходы к классификации демпферов, однако имеют место некоторые отличия, поэтому следует их рассмотреть по отдельности.

В отечественных работах демпферы рассматриваются с точки зрения функционально-конструктивного и нормативного подходов, при этом они зачастую оказываются взаимосвязаны, так как классификация привязана к конкретной области применения: железнодорожный транспорт, судостроение, авиация, и регламентируется государственными и отраслевыми стандартами [1]-[3]. Примечательно, что в российской

практике отраслевая принадлежность является основным классификационным признаком, которая определяет всю структуру стандарта, а соответственно, и классификацию демпфирующих устройств. Принцип работы демпфера выступает как вторичный, уточняющий признак внутри отраслевого класса. Но в общем случае можно выделить имеющееся разделение на демпфирующие устройства и покрытия [4]. Так непосредственно демпферы разделяются на:

- фрикционные демпферы: работают за счет взаимодействия жестких тел, при котором энергия колебаний рассеивается через силу трения;
- жидкостные (гидравлические) демпферы: преобразуют механическую энергию в энергию жидкости (или газа).

Классификация вибропоглощающих покрытий – основного инструмента демпфирования для тонкостенных конструкций – более обширна и проработана. По характеру деформации их делят на четыре типа:

- жесткие: энергия поглощается посредством деформаций растяжения-сжатия вдоль поверхности;
- мягкие: поглощение преимущественно за счет деформаций сдвига;
- армированные: жесткий слой, присутствующий в конструкции, повышает эффективность поглощения вибраций;
- комбинированные: сочетание разных принципов для расширения рабочего частотного диапазона.

В зарубежной практике классификация демпфирующих устройств производится на основе механизма рассеяния энергии и является первичной основой классификации. Отраслевая принадлежность является областью применения, которая может регламентироваться отдельными документами [5]-[7], и является вторичным признаком по отношению к механизмам диссипации энергии. Этот аспект является отличительной особенностью от отечественной практики.

По физическому механизму рассеяния энергии демпфирование разделяется на четыре типа: вязкое, гистерезисное (вязкоупругое), структурное и демпфирование трением [8]. При этом стоит отметить, что данные механизмы также используются в российской классификации.

Вязкое демпфирование (Fluid Viscous Dampers, VFD) связано с поведением жидкости. Так, при движении тела в вязкой среде создается трение между слоями среды, которое и создает демпфирующую силу. Сила сопротивления $F_{\text{вязк}}$ прямо пропорциональна относительной скорости и рассчитывается по формуле [8]:

$$F_{\text{вязк}} = \mu \dot{x}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент сопротивления среды (вязкого демпфирования), Н*с/м; $\dot{x}$ – первая производная по времени от перемещения x .

Энергия рассеивается посредством вязкого трения между слоями жидкости, а также между жидкостью и стенками сосуда. При этом имеет место сильная зависимость от частоты колебаний – рассеянная за один цикл энергия $D_{\text{вязк}}$ пропорциональна частоте и в работе [8] вычисляется с помощью формулы (2):

$$D_{\text{вязк}} = \pi \mu \omega X^2, \quad (2)$$

где ω – частота; X – амплитуда перемещения.

Области применения вязкого демпфирования – гидравлические амортизаторы, сейсмические демпферы для зданий.

Гистерезисное (вязкоупругое) демпфирование (Viscoelastic Dampers, VED) основано на свойствах самого материала, а именно на внутреннем трении на межмолекулярном уровне. При циклическом деформировании твердых тел внутри них происходят необратимые процессы, за счет которых энергия деформаций преобразуется во внутреннюю энергию материала. Сила сопротивления $F_{\text{гист}}$ представляется как сумма упругой и демпфирующей составляющих, сдвинутых по фазе на $\frac{\pi}{2}$ (90°), что отражено в формуле (3) [8]:

$$F_{\text{гист}} = F_{\text{упр}} + F_{\text{д}} = kx + \frac{\eta k}{\omega} \dot{x}, \quad (3)$$

где k – коэффициент упругости материала; η – коэффициент потерь материала.

Энергия рассеивается из-за процессов разрушения и восстановления межмолекулярных связей, при этом рассеянная за один цикл энергия слабо зависит от частоты и пропорциональна квадрату амплитуды деформации (перемещения):

$$D_{\text{гист}} = \pi k \eta X^2. \quad (4)$$

Применение – спецматериалы на основе полимеров, резиновые прокладки, устройства, основанные на пластической деформации металлов.

Структурное (конструкционное) демпфирование возникает в соединениях и стыках конструкции, где имеет место контакт и трение между её элементами. В любом реальном конструкционном соединении есть неровности, зазоры и перенапряжения. При вибрации в них происходят малые перемещения сопряженных поверхностей, что приводит к появлению работы сил трения, на которую расходуется часть энергии колебаний. В работе [8] конструкционное демпфирование описано нелинейной моделью, выделенной отдельно. Она отличается от классической модели конструкционного демпфирования, которая выражается теми же формулами, что и вышеописанная гистерезисная модель. Так, формула для силы сопротивления $F_{\text{стр}}$ представлена следующей формулой (5) [8]:

$$F_{\text{стр}} = \eta k |x| \operatorname{sgn}(\dot{x}), \quad (5)$$

где $\operatorname{sgn}(\dot{x})$ – сигнум функция.

Потери энергии происходят за счет трения и микроударов в зоне контакта, зависимость от частоты мала. За один цикл рассеивается энергия, определяемая по формуле (6) [8]:

$$D_{\text{стр}} = 2k\eta X^2. \quad (6)$$

Структурное демпфирование проявляется в диссипации энергии в болтовых и замковых соединениях, в заклепочных швах, в прессовых посадках подшипников.

Демпфирование трением (Friction Dampers) основано на трении скольжения между двумя поверхностями, которые прижаты друг к другу с некоторым усилием. Потеря энергии происходит за счет преобразования в тепло в зоне контакта при относительном проскальзывании поверхностей (закон трения Кулона). Сила сопротивления $F_{\text{тр}}$ в работе [8] рассчитывается по формуле (7):

$$F_{\text{тр}} = F_f \operatorname{sgn}(\dot{x}), \quad (7)$$

где F_f – сила трения в зоне контакта.

Потери энергии зависят от амплитуды смещения и силы трения. Ключевым отличием от других видов демпфирования является форма петли гистерезиса, которая

в идеальном случае выглядит как прямоугольник, а значит при той же амплитуде потери энергии (площадь петли гистерезиса) максимальны. Потери рассчитываются по следующей формуле (8) [8]:

$$D_{\text{тр}} = 4F_f X. \quad (8)$$

Демпфирование трением имеет место во фрикционных вставках и втулках, прижимаемых силами, которые возникают при работе конструкции (например, центробежная сила).

По методу управления демпфирование принято разделять на пассивное, активное и гибридное (комбинированное). Такая классификация используется как в зарубежной, так и в отечественной практике.

Пассивные методы являются наиболее распространенными из-за своей простоты и большой эффективности на высоких частотах (рисунок 1). Они успешно применяются при гашении вибрации конструкциях различной сложности и назначения. Принцип работы заключается в том, что вибрационная энергия рассеивается за счёт свойств самой конструкции или добавленных материалов, без затрат внешней энергии.

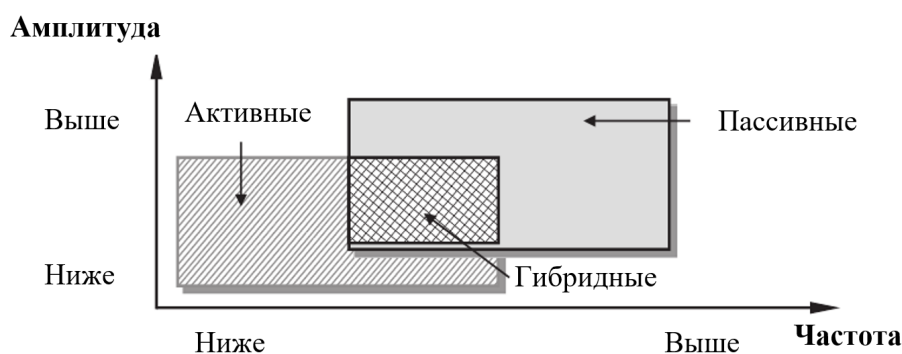


Рисунок 1 – Рабочие диапазоны различных методов демпфирования

Варианты пассивного демпфирования, следующие:

- свободные и стесненные демпфирующие слои: используется вязкоупругий материал. В свободном слое энергия гасится посредством деформации растяжения/сжатия, в стесненном – из-за сдвига;

- шунтированные пьезоэлектрики: пьезопленка преобразует механическую энергию в электрическую, которая в свою очередь рассеивается в виде тепла во внешней электрической цепи;

- демпфирующие слои с пьезоэлектрическим шунтированием: комбинация прошлых двух вариантов – пьезопленка пассивно ограничивает деформацию вязкоупругого слоя, а также подключена к шунтирующей цепи;

- магнитные стесненные демпфирующие слои: вместо простого вязкоупругого слоя используются магнитные полосы. Их взаимодействие (отталкивание или притяжение) усиливает растяжение/сжатие или сдвиг вязкоупругого слоя, работая как динамический гаситель;

- демпфирование волокнами с памятью формы: в конструкцию внедряют упругие волокна с памятью формы, имеющих петлю гистерезиса, что приводит к поглощению энергии.

Активное демпфирование основано на использовании датчиков и приводов, создающих силы, которые противодействуют вибрации в реальном времени. В основном, они используются для демпфирования вибраций на низких частотах, где пассивные

методы неэффективны, а также при изменении рабочих температур, т.к. свойства материалов, используемых в пассивных методах, могут зависеть от температуры довольно сильно.

Принцип работы активных демпферов упрощённо можно представить следующим образом. Установленный в определенном месте датчик улавливает колебания, затем посылает сигнал к управляющему приводу, который создает новое колебание, противодействующее исходному (обычно в противофазе, чтобы колебания гасились за счет явления интерференции) (рисунок 2). Важным отличием активных методов от пассивных является необходимость во внешнем источнике энергии для работы.

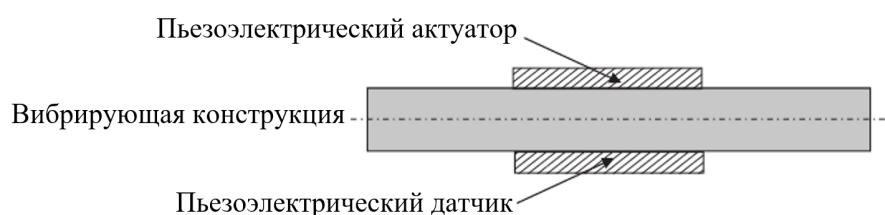


Рисунок 2 – Устройство активного демпфера

Гибридные методы демпфирования, по сути, используют пассивные и активные методы совместно, чтобы создать систему, позволяющую бороться с вибрациями в широком диапазоне частот и температур.

Наиболее часто используются следующие гибридные методы:

- активные стесненные демпфирующие слои: классическая сэндвич-панель, где ограничивающий слой представляет собой привод, увеличивающий сдвиговую деформацию вязкоупругого слоя;
- активные пьезоэлектрические демпфирующие композиты: стержни из пьезокерамики внедряются в полимерную матрицу под определенным углом, чтобы управлять демпфированием сжатия и сдвига;
- электромагнитные демпфирующие композиты: вязкоупругий слой зажимается между постоянным магнитом и электромагнитом, что позволяет настраивать жесткость в зависимости от условий работы;

Активные шунтированные пьезоэлектрические сети: пассивная электрическая цепь активно включается и выключается, чтобы максимизировать мгновенное рассеяние энергии.

1.2 Основные параметры демпферов

Любое демпфирующее устройство, вне зависимости от принципа действия и применяемых материалов, можно классифицировать по размерам, направлению действия и рабочему диапазону частот.

Размеры демпферов могут быть самыми разнообразными – в зависимости от размеров конструкции, в которой они применяются. И если в некоторых отраслях к габаритным размерам демпферов не предъявляется строгих требований, то, например, в авиации и космической технике вместе с компактностью устанавливается ограничение по массе. Эти ограничения, зачастую, ведут к разработке новых разновидностей демпфирующих устройств, которые позволяют эффективно гасить колебания при сниженной массе и размерах. Размеры типовых демпферов, выпускаемых серийно, обычно, составляют определённые серии типоразмеров, что гарантирует покрытие широкого диапазона требований рынка.

С размерами демпферов неразрывно связаны такие параметры как рабочий ход и максимально допустимая нагрузка. Чаще всего эти две характеристики применяют в отношении устройств, которые используют механическое сопротивление движению (например, пружинные, гидравлические, резиновые демпферы). Рабочий ход представляет собой максимально допустимую амплитуду перемещения при работе. Эта величина может значительно варьироваться в зависимости от конструкции демпфера и размеров демпфируемой структуры. Максимально допустимая нагрузка определяет несущую способность демпфера. Чаще всего, она указывается в кг (т) в статическом случае для установки на них оборудования (например, станков или мебели) и в Н (кН) для характеристики работы устройства при динамическом воздействии.

Демпфирующие устройства разрабатываются так, что они успешно борются с вибрацией в только в одном или нескольких определённых направлениях. Одноосные демпферы (или линейного действия) являются наиболее распространенными. При этом разделяют горизонтальные и вертикальные устройства. Также имеется классификация по знаку усилия: демпферы, работающие только на сжатие или только на растяжение и работающие одинаково хорошо в обоих направлениях. Примерами могут служить автомобильные амортизаторы, мебельные газлифты, виброопоры для оборудования.

Двухосные (плоскостные) демпферы воспринимают нагрузки в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Обычно применяются в сейсмоизоляции, где необходимо гашение колебаний в плоскости пола вне зависимости от их направления.

Всенаправленные (объемно-направленные) демпферы предназначены для борьбы с вибрациями по всем степеням свободы (3 поступательных и 3 вращательных). Обычно они представляют собой комплекс из нескольких демпферов, работающих каждый в своем направлении. Такие применяются при виброзащите трубопроводов, где направление вибрации непостоянно [9].

Рабочий диапазон частот – это диапазон в частотной области, в которой демпфирующее устройство работает наиболее эффективно. Вне этого диапазона он либо не гасит колебания, либо наоборот, приводит к их усилению вследствие резонансных явлений.

Так, при вязком механизме демпфирования сила сопротивления пропорциональна скорости движения, и, следовательно, эффективность гашения колебаний увеличивается с ростом их частоты. Поэтому в низкочастотной области вязкое демпфирование малоэффективно.

При вязкоупругом (гистерезисном) демпфировании определяющими являются свойства материала, а именно модуль накопления E' (вещественная часть комплексного модуля упругости, характеризующая упругость системы) и коэффициент потерь η (определяет часть энергии, безвозвратно переходящей в тепло) [8]. Эти параметры имеют частотную и температурную зависимость (рисунки 3 и 4), при этом различают 3 области: стеклообразную, переходную и высокоэластическую. Для каждого конкретного материала его свойства и, следовательно, рабочий диапазон определяются совокупностью этих зависимостей. Стоит отметить, что наибольшие значения коэффициента потерь η находятся в переходной области.

Конструкционное демпфирование и демпфирование трением слабо зависят от частоты колебаний, что выгодно отличает их от вязких демпферов в низкочастотной области. При этом для них определяющим фактором часто становится амплитуда колебаний, а не частота [10], [11].

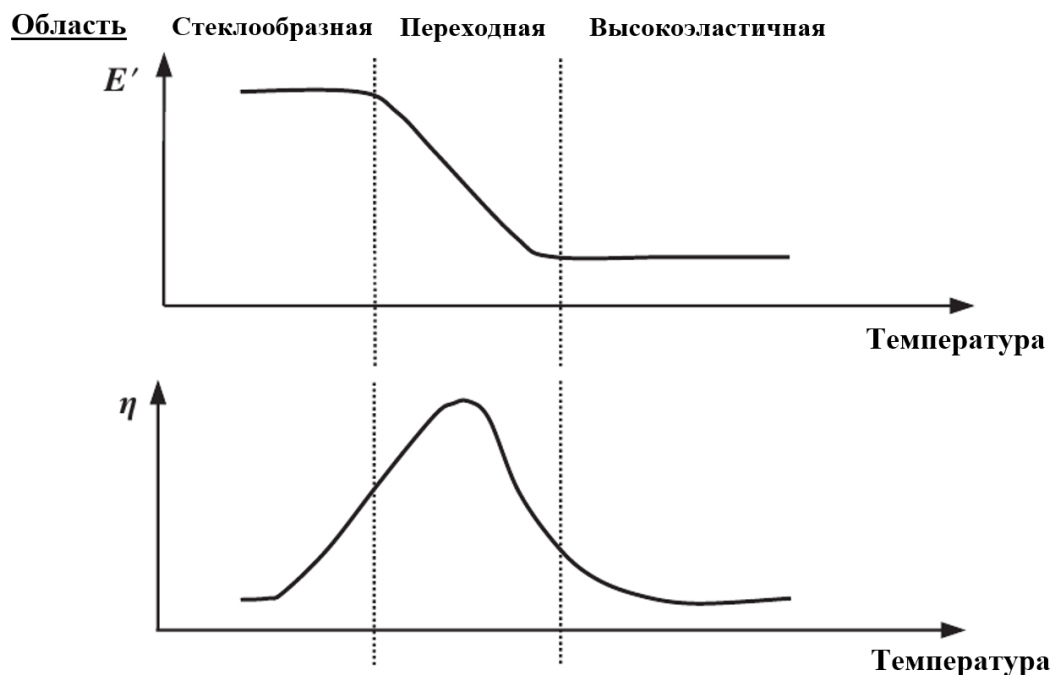


Рисунок 3 – Графики зависимости модуля накопления E' и коэффициента потерь η от температуры при постоянной частоте

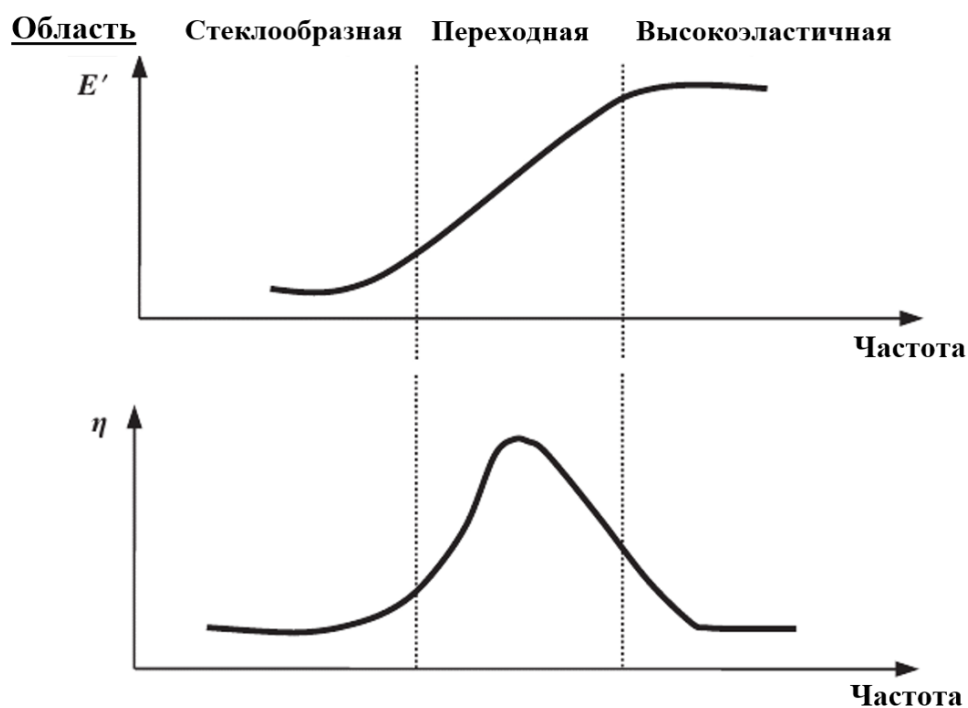


Рисунок 4 – Графики зависимости модуля накопления E' и коэффициента потерь η от частоты при постоянной температуре

2 Модели вязкоупругих демпферов

Для практического применения вязкоупругих материалов в демпферах необходимо иметь возможность описывать их поведение математически. Важным отличием от упругих тел, где связь между напряжением и деформацией однозначно описывается законом Гука, является то, что вязкоупругие материалы обладают эффектом памяти. Их

реакция зависит не только от текущего воздействия, но и от предыстории нагружения. Поэтому для их описания используют модели, представляющие собой совокупность двух простейших идеализированных элементов – упругой пружины и вязкого демпфера (элементы Гука и Ньютона соответственно).

Элемент Гука – пружина – моделирует упругую реакцию системы. Возникающее напряжение пропорционально деформации, а потенциальная энергия запасается и полностью возвращается при разгрузке. Элемент Ньютона – вязкий демпфер – в свою очередь, моделирует возникающую силу, которая пропорциональна скорости деформирования и приводит к необратимой диссипации энергии в тепло. За счет комбинирования этих двух элементов последовательно или параллельно, получают модели разной степени сложности и точности для описания рассматриваемых систем. Простейшими и исторически первыми являются модели Максвелла, Кельвина-Фойгта и Пойнтинга-Томсона (рисунок 5).

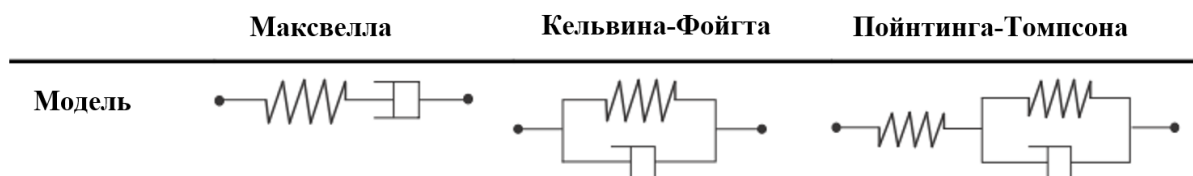


Рисунок 5 – Простейшие модели вязкоупругих материалов

В модели Максвелла пружина и демпфер соединены последовательно (рисунок 5). Дифференциальное уравнение модели Максвелла имеет вид:

$$\lambda \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = \mu \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (9)$$

где $\lambda = \frac{\mu}{E}$ – время релаксации, которое отражает скорость релаксационных процессов, E – модуль упругости пружины, μ – коэффициент вязкого сопротивления демпфирующего элемента (в работе [8] обозначается как c_d и называется «коэффициент демпфирования»), t – время, σ – возникающее напряжение, ε – деформация.

Она правильно описывает релаксацию напряжения (падение напряжения при постоянной деформации). При подстановке $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = const$ в формулу (9) и решении дифференциального уравнения получим:

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 e^{-t/\lambda}. \quad (10)$$

Видно, что при $t \rightarrow \infty$ напряжение $\sigma \rightarrow 0$, то есть модель описывает полную релаксацию напряжения (рисунок 6а). Однако модель даёт нереалистичную картину ползучести: под постоянной нагрузкой деформация неограниченно возрастает, а при снятии нагрузки – остается на достигнутом уровне деформаций с учетом вычета упругой составляющей (рисунок 6б). Подставив $\sigma(t) = \sigma_0 = const$ в формулу (9) и решив дифференциальное уравнение, получим:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 + t/\lambda). \quad (11)$$

В модели Кельвина-Фойгта элементы соединены параллельно (рисунок 5). Дифференциальное уравнение модели имеет вид:

$$\sigma(t) = E\varepsilon + \mu \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (12)$$

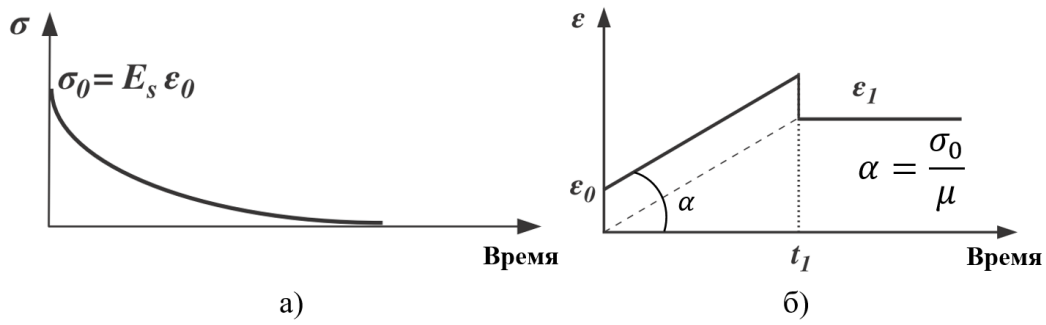


Рисунок 6 – Графические зависимости модели Максвелла: а) релаксация, б) ползучесть, t_1 – момент времени, в который снимается нагрузка

Эта модель, наоборот, хорошо передаёт ограниченную ползучесть. Действительно, после подстановки $\sigma(t) = \sigma_0 = const$ в формулу (12) и решения дифференциального уравнения, получаем:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-t/\lambda}). \quad (13)$$

При нагружении деформация стремится к конечной величине $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E}$, а после снятия нагрузки – к исходному значению деформаций (рисунок 7б), что соответствует реальному поведению, т.е. модель Кельвина-Фойгта описывает ограниченную ползучесть. Однако и у этой модели есть недостаток: она совершенно не описывает релаксацию, т.к. напряжение остаётся постоянным сколь угодно долго (рисунок 7а). При подстановке $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = const$ в формулу (12) сразу получим:

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 = const. \quad (14)$$

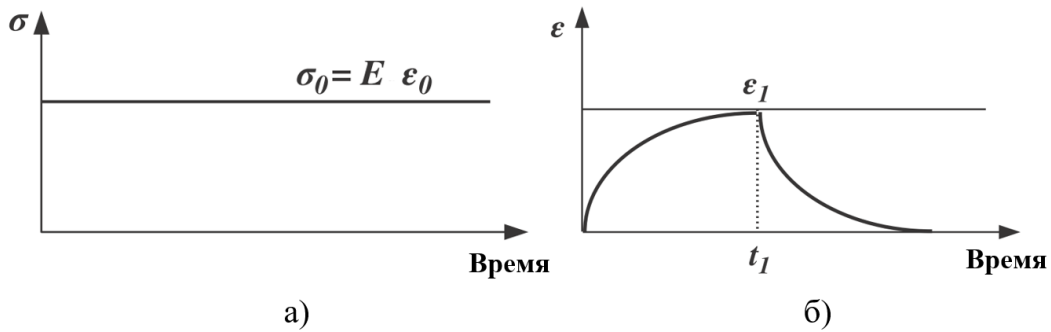


Рисунок 7 – Графические зависимости модели Кельвина-Фойгта: а) релаксация, б) ползучесть, t_1 – момент времени, в который снимается нагрузка

Таким образом, каждая из этих двух моделей по отдельности не способна воспроизвести весь комплекс свойств реального вязкоупругого материала.

Следующая модель – Пойнтинга–Томсона (иногда называемая стандартной линейной моделью твёрдого тела) объединяет достоинства обеих предыдущих: она представляет собой последовательное соединение пружины и блока Кельвина-Фойгта (рисунок 5). Дифференциальное уравнение модели имеет вид:

$$\sigma + \alpha \frac{d\sigma}{dt} = E_\infty \varepsilon + \beta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (15)$$

где $E_\infty = \frac{E_s E_p}{E_s + E_p}$ – равновесный (длительный) модуль, E_s – модуль упругости последовательной пружины, E_p – модуль упругости пружины в блоке Кельвина-Фойгта, $\alpha = \frac{\mu}{E_s + E_p}$ – время релаксации в модели Пойнтинга-Томсона, $\beta = \frac{\mu E_s}{E_s + E_p}$ – коэффициент для удобства записи.

Эта модель уже качественно верно описывает и ползучесть, и релаксацию, а её поведение при гармоническом нагружении (частотные зависимости модуля накопления и коэффициента потерь) приближается к наблюдаемому у реальных полимеров. Так формула деформации в случае $\sigma(t) = \sigma_0 = const$ выглядит следующим образом:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_\infty} \left(1 + \frac{E_\infty - E_s}{E_s} e^{-\frac{t}{\lambda}} \right), \quad (16)$$

где, $\lambda = \frac{\mu}{E_p}$. При $t \rightarrow \infty$ деформация стремится к конечной величине $\varepsilon_\infty = \frac{\sigma_0}{E_\infty}$, а при снятии нагрузки – падает до нуля, то есть модель описывает ограниченную ползучесть (рисунок 8б).

Формула для релаксации напряжения при $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = const$ представляется как:

$$\sigma(t) = E_\infty \varepsilon_0 [1 - e^{-t/\alpha}] + E_s \varepsilon_0 e^{-t/\alpha}, \quad (17)$$

При $t \rightarrow \infty$ напряжение стремится к $\varepsilon_\infty = E_\infty \varepsilon_0$ – конечной, а не нулевой величине, что соответствует реальному поведению (рисунок 8а).

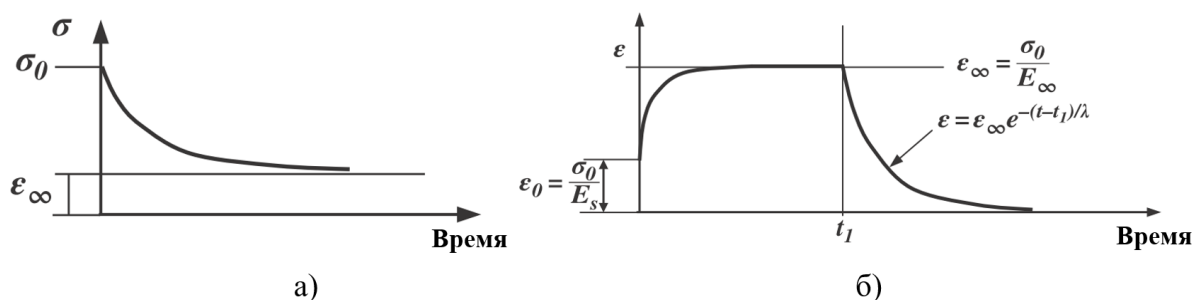


Рисунок 8 – Графические зависимости модели Пойнтинга-Томсона: а) релаксация, б) ползучесть, t_1 – момент времени, в который снимается нагрузка

Именно поэтому модель Пойнтинга-Томсона часто используют в качестве простейшей рабочей модели вязкоупругого демпфера. Вместе с тем ей присущи количественные ограничения: она не способна описать широкий частотный диапазон с той точностью, которая требуется для современных инженерных расчётов. Стоит также отметить, что во всех трех рассмотренных моделях рассматриваемые функции являются функциями одной переменной – времени t . Это объясняется тем, что эти модели являются локальными, или реологическими: они описывают поведение материала в бесконечно малом объёме (в точке), связывая напряжение и деформацию в зависимости от времени и предыстории нагружения. В реальных конструкциях напряжения и деформации, разумеется, меняются от точки к точке и поэтому для их полного описания в уравнения движения вводят частные производные по пространственным координатам. Однако фундаментальное звено, описывающее реакцию материала, остаётся локальным и зависит только от времени. Поэтому в приведенных соотношениях и используются полные производные по времени.

Для устранения недостатков рассмотренных моделей применяют обобщённые модели – обобщённую модель Максвелла и обобщённую модель Кельвина-Фойгта. Они состоят из многих параллельно или последовательно соединённых элементарных ветвей

(Максвелла или Кельвина-Фойгта) и позволяют аппроксимировать релаксационный спектр материала с любой требуемой точностью. Рассмотрим на примере обобщенной модели Максвелла, состоящей из N параллельных ветвей Максвелла. Она имеет комплексный модуль упругости:

$$E^*(i\omega) = E_\infty + \sum_{k=1}^N E_k \frac{i\omega\tau_k}{1 + i\omega\tau_k}, \quad (18)$$

где $\tau_k = \frac{\mu_k}{E_k}$ – время релаксации ветви k , ω – частота, индекс k подразумевает, что параметр относится к ветви с номером k .

Такая форма позволяет аппроксимировать экспериментальные данные с любой требуемой точностью, подбирая число ветвей N и параметры E_k, τ_k . Именно такие многопараметрические модели лежат в основе большинства современных конечно-элементных пакетов. Их параметры (времена релаксации, весовые коэффициенты) определяют по экспериментальным данным.

Ещё более компактное описание предоставляют модели с дробными производными, например, четырёхпараметрическая модель Багли–Торвик. В рассматриваемой работе [8] при появлении дробных производных равновесный модуль обозначается E_0 (вместо E_∞ , показанного при рассмотрении модели Пойнтинга–Томсона), а мгновенный – как раз через E_∞ . В этих обозначениях модель Пойнтинга–Томсона, рассмотренная выше, соответствовала бы выбору $E_0^{\text{BT}} = E_\infty^{\text{ПТ}} = \frac{E_s E_p}{E_s + E_p}$ и $E_\infty^{\text{BT}} = E_s^{\text{ПТ}}$. Тогда уравнение модели Багли–Торвика выглядит следующим образом:

$$\sigma(t) + \tau^\alpha D^\alpha \sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) + E_\infty \tau^\alpha D^\alpha \varepsilon(t), \quad (19)$$

где D^α – оператор дробного дифференцирования порядка α , $E^*(i\omega) = \frac{E_0 + E_\infty (i\omega\tau)^\alpha}{1 + (i\omega\tau)^\alpha}$ – комплексный модуль модели, имеющий всего четыре параметра ($E_0, E_\infty, \tau, \alpha$), способен описать поведение материала в исключительно широком диапазоне частот и температур.

Таким образом, при проектировании вязкоупругого демпфера имеется целый арсенал готовых моделей – от простейшей модели Пойнтинга–Томсона до многопараметрических обобщённых моделей и моделей с дробными производными. Выбор конкретной модели определяется требуемой точностью, объёмом доступных экспериментальных данных и вычислительными ресурсами. Выбор конкретной модели и определение её параметров под заданные частотно-температурные характеристики демпфера представляет собой нетривиальную задачу, решению которой в данной работе предлагается содействовать методами искусственного интеллекта (ИИ).

3 Перспективы и методика использования методов искусственного интеллекта

3.1 Описание перспектив применения систем искусственного интеллекта в области разработки моделей вязкоупругих материалов

Модель Пойнтинга–Томсона, рассмотренная в предыдущем разделе, является простым случаем. Чаще для описания процессов демпфирования необходимы более сложные модели, состоящие из множества простейших структурных элементов. При увеличении сложности механизмов работы демпфера возрастает количество элементов, а соответственно, и количество способов их взаимосвязи. Всё это ведёт к уходу от простых линейных зависимостей к более сложным нелинейным. На сегодняшний день для расчёта нелинейных задач существуют программы и целые программные комплексы.

Отличительной чертой нелинейных расчётов является их трудоёмкость: как в плане вычислительных ресурсов, так и времени расчёта.

Технологии ИИ применяются при решении такого рода задач, в том числе и в области вязкоупругих демпферов. В частности, выделяется отдельный класс нейросетей – физически-информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks – PINN). В их обучение заложены фундаментальные физические законы, представляемые обычно в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Отличие PINN от обычных нейросетей заключается в следующем: PINN обучаются на экспериментальных или симуляционных данных, но при этом имеют в своём распоряжении те самые физические уравнения. Это позволяет им делать прогнозы не только на основе обучающих выборок, но и в согласии с физическими законами.

Так, в работе [12] показано, что применение теории PINN для описания поведения вязкоупругих демпферов позволяет обойти ограничения традиционных моделей, связанные с ошибками прогнозирования при сложных условиях нагружения. Возможности же обычных искусственных нейронных сетей, интегрированных с алгоритмами оптимизации, для подбора параметров демпферов продемонстрированы в [13].

В рамках рассматриваемой области предполагается возможность использования как обычных нейросетей – для решения задачи о подборе оптимальных вариантов вязкоупругих материалов для демпфера, так и сетей PINN – для верификации подбора материала или для решения задачи построения и оптимизации нелинейных моделей демпферов.

3.2 Методика внедрения ИИ при разработке моделей вязкоупругих материалов

Внедрение ИИ в исследуемой области предполагается проводить в два этапа. На первом этапе производится создание и обучение нейросети, предназначенной для подбора вязкоупругого материала демпфера по заданным требованиям.

Это задача является классической задачей классификации: на основе входных параметров (диапазон интересующих частот и температур) должно быть получено предсказание с вариантом или вариантами подходящего материала (или его свойствами, такими как модуль накопления E' и коэффициент потерь η).

На этом этапе какие-либо дифференциальные уравнения и необходимость их решения отсутствуют. Происходит работа с массивами данных – графиками или таблицами зависимостей E' и η от частоты и температуры. Задача сводится к поиску сложной нелинейной зависимости в многомерном пространстве данных, и классические полносвязные нейронные сети отлично справляются с этим.

Если входными данными будут являться не отдельные точки, а целые кривые (графики), то подходящим выбором будут сверточные нейронные сети. Они позволят выявить характерное поведение кривых модуля накопления и коэффициента потерь при изменении температуры и соотносить их с конкретным материалом.

На первом этапе можно ограничиться использованием полносвязных и сверточных ИНС, однако возможным улучшением может являться внедрение PINN для верификации подобранного материала. PINN позволит смоделировать поведение демпфера, изготовленного из предложенного материала, основанное на реальной физике процессов, что, по сути, заменит собой верификационные расчёты и сэкономит вычислительные и временные ресурсы.

Второй этап представляет собой создание ИНС, состоящих из PINN, для решения

задачи о построении и оптимизации нелинейных демпферов из комбинаций простейших элементов (моделей). При этом есть два шага развития этого этапа.

Первый шаг (минимальный) – применение ИНС для идентификации неизвестных параметров модели вязкоупругого демпфера. На основе структуры модели демпфера (например, модель Пойнтинга–Томсона) необходимо определить наиболее подходящие значения входящих в неё параметров (жёсткостей пружин, коэффициентов вязкости). Это является обратной задачей, для которой PINN эффективны. В качестве обучающих данных выступают результаты экспериментов (петли гистерезиса) и физические уравнения. К примеру, все перечисленные в разделе 2 аналитические выражения для комплексного модуля $E^*(i\omega)$ (или, в более общем случае, для реологического соотношения между напряжением и деформацией) представляют собой компактную запись физического закона, который в дальнейшем может быть непосредственно заложен в структуру физически-информированной нейронной сети. В этом качестве они служат «учителем», направляющим обучение сети и гарантирующим физическую достоверность получаемых результатов. Особенностью PINN является возможность их эффективной работы при малом объёме обучающих данных, так как физические уравнения, вводимые в неё, выступают в роли «направляющих», которые не позволяют получить слишком оторванные от реальности прогнозы. В литературе [14] описано прямое применение PINN для настройки моделей крутильных демпферов, где коэффициенты жёсткости и демпфирования представлены в виде графа нейронной сети.

Второй шаг – использование ИНС для открытия новых структур моделей демпферов, когда требуется не просто уточнение или нахождение параметров модели, а синтез новой, более сложной комбинации базовых элементов. Один из подходов в этом случае – построение суррогатной модели на основе классической полносвязной нейронной сети, которая будет очень быстро предсказывать поведение системы. Эта модель затем используется для оптимизации с помощью генетических алгоритмов за счёт перебора множества возможных структурных комбинаций и выбора из них наилучшей. Положительный эффект заключается в скорости получения прогноза: после обучения предсказание создаётся за очень короткий срок, при этом может быть рассмотрено большое количество вариантов структур. Это позволяет не проводить долгие и объёмные расчёты (например, методом конечных элементов). Пример реализации подхода на основе суррогатного моделирования для оптимизации параметров демпфера приведён в [12].

Стоит также отметить недостатки и трудности данных этапов. Главной проблемой является отсутствие качественных датасетов для рассмотренных задач [15]. На данный момент отсутствуют публичные хранилища данных, содержащие данные об экспериментах с демпферами. Возможным решением является либо получение данных из уже проведённых и новых экспериментов, либо с помощью численного моделирования, которое, по-хорошему, также должно сходиться с экспериментами.

Отсюда вытекает вторая проблема – из-за обучения моделей на синтетических данных, полученных в ходе моделирования, модель не учится работать с реальными данными, снятыми с оборудования, на которых, в большинстве случаев, присутствуют шумы и помехи [16]. Решением является применение большего числа реальных данных и контроль за долей синтетических данных в датасетах.

Третьей трудностью является сложность и стоимость обучения PINN [17]. Этот процесс является нетривиальной задачей, требующей тщательного подбора архитектуры сети, настройки весов в многокомпонентной функции потерь и других гиперпараметров. Неудачная настройка может привести к тому, что сеть просто не обучится. Возможное решение – разработка методик эффективной настройки PINN для обучения.

Можно также выделить проблему, связанную с интерпретацией получаемых

результатов [18]. Традиционные инженерные решения основаны, в первую очередь, на проверенных физических законах и расчётах. С помощью нейросети может быть получен результат, который сложно проверить. Отсутствие реально существующих данных приводит к тому, что верификация модели становится крайне сложна. Этот аспект препятствует принятию ИИ-решений в ответственных конструкциях. Возможное решение – разработка методов для оценки и объяснения факторов, лежащих в основе индивидуальных решений ИНС.

Заключение

В данной работе были рассмотрены современные представления о демпфирующих устройствах. Рассмотрены основные типы демпферов, их отечественная и зарубежная классификации и их особенности, механизмы рассеяния энергии, а также их ключевые технические параметры. Отмечено особое место вязкоупругих демпферов благодаря свойствам вязкоупругих материалов в их составе, позволяющим управлять диссипативными свойствами посредством подбора состава и структуры материала.

Проанализированы математические модели вязкоупругих материалов – от простейших, таких как модели Максвелла, Кельвина-Фойгта, Пойнтинга-Томсона, до обобщённых и моделей с дробными производными. Отмечено, что выбор адекватной модели и определение её параметров под заданные частотно-температурные условия являются нетривиальной и вычислительно трудоёмкой задачей.

Показано, что технологии искусственного интеллекта, в особенности физически-информированные нейронные сети и суррогатные модели на основе обычных нейросетей, открывают новые возможности для ускорения и повышения качества проектирования вязкоупругих демпферов. Предложена двухэтапная методика внедрения ИИ: на первом этапе – подбор материала с помощью классических полносвязных и сверточных сетей, на втором – идентификация параметров и синтез структуры модели демпфера с использованием физически-информированных нейронных сетей в сочетании с генетическими алгоритмами.

Выделены основные проблемы, препятствующие широкому внедрению ИИ в данной области: отсутствие качественных датасетов, расхождение между синтетическими и реальными данными, сложность обучения физически-информированных нейронных сетей и проблема интерпретируемости результатов. Для каждого представленного пункта предложены возможные пути решения.

Представленный в статье материал может быть использован как основа для дальнейших работ и исследований, направленных на создание интеллектуальных инструментов проектирования вязкоупругих демпферов, которые позволят эффективно сочетать накопленные знания с растущими возможностями искусственного интеллекта

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 55184-2012. Демпферы гидравлические железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия / утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26.11.2012 № 1163-ст. / разработан Открытым акционерным обществом «Научный и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ») – III, 11 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ 17053.1-80. Амортизаторы корабельные АКСС-М. Технические условия [Текст] : государственный стандарт Союза ССР / утверждён Постановлением

Госстандарта СССР от 30 мая 1980 г. № 2446. – Москва : Издательство стандартов, 1980. – 18 с.

3. ОСТ 1 03612-72. Демпферы. Типы и основные параметры, технические требования [Текст] : отраслевой стандарт. – 1972. – 9 с.

4. Иванов, Николай Игоревич. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова. - 5. - Москва : Издательская группа "Логос", 2020. - 432 с. - ISBN 978-5-98704-659-3 : Б. ц.

5. EN 15129:2010. Anti-seismic devices [Text] : European Standard. – Brussels : CEN, 2010. – 171 p.

6. Садек, Ф. Пассивные устройства рассеивания энергии для сейсмостойких зданий / Ф. Садек, Б. Мохраз, А. У. Тейлор, Р. М. Чунг. – Ноябрь 1996. – 66 с. – (NISTIR-5923; PB97132054).

7. VDI 3830 «Damping of materials and members» : в 5 ч. / VDI-Gesellschaft Produkt und Prozessgestaltung. – URL: <https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-3830-blatt-1-damping-of-materials-and-members-classification-and-survey>. – Текст : электронный.

8. Baz A. M. Active and passive vibration damping / Amr M. Baz. – Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2019. – xxxii, 719 с. – ISBN 978-1-118-48192-9.

9. Патент № 32332 Республика Казахстан, МПК В25J 11/00, F16F 13/00, F16F 15/00. Пространственная амортизационная (демпфирующая) система : № 2015/0711.1 : заявл. 14.09.2022; опубл. 21.07.2023 / Бисембаев К., Орынбаева Н. С. ; заявитель и патентообладатель Некоммерческое акционерное общество «Университет имени Шакарима города Семей». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

10. Zare Estakhraji S. I. A thorough comparison between measurements and predictions of the amplitude dependent natural frequencies and damping of a bolted structure / S. I. Zare Estakhraji, M. Wall, J. Capito, M. S. Allen // Journal of Sound and Vibration. – 2022. – Vol. 541. – Art. 117397. – DOI: 10.1016/j.jsv.2022.117397.

11. Shirai Y. Energy response of a passive variable friction damper and numerical simulation on the control effects for high rise buildings / Y. Shirai, K. Nakata, A. Toyooka // Structural Control and Health Monitoring. – 2022. – Vol. 29, iss. 12. – Art. e3124. – DOI: 10.1002/stc.3124.

12. Li Q.-Q. Characterization of Dynamic Mechanical Properties of Viscoelastic Damper Based on Physics Constrained Data Driven Approach / Q.-Q. Li, Z.-D. Xu, Y.-R. Dong, Z.-H. He // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2023. – Vol. 24. – Art. 2450071. – DOI: 10.1142/S0219455424500718.

13. Liu Q. Seismic Optimization of Fluid Viscous Dampers in Cable Stayed Bridges: A Case Study Using Surrogate Models and NSGA II / Q. Liu, Z. Liu, J. Zhao, Y. Lei // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – Art. 15(9):1446. – DOI: 10.3390/buildings15091446.

14. Yucsan Y. A. Adjusting a torsional vibration damper model with physics informed neural networks / Y. A. Yucsan, F. A. C. Viana, L. Manin, J. Mahfoud // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 154. – Art. 107552. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107552.

15. Milićević P. Data generation framework for inverse modeling of nonlinear systems in structural dynamics applications / P. Milićević, O. Altay // Acta Mechanica. – 2023. – Vol. 235. – P. 1493–1515. – DOI: 10.1007/s00707-023-03532-3.

16. Hoffmann J. Machine learning in a data limited regime: Augmenting experiments with synthetic data uncovers order in crumpled sheets / J. Hoffmann, Y. Bar Sinai, L. M. Lee, J. Andrejevic // Science Advances. – 2019. – Vol. 5. – Art. eaau6792. – DOI: 10.1126/sciadv.aau6792.

17. Bonfanti A. The Challenges of the Nonlinear Regime for Physics Informed Neural

Networks / A. Bonfanti, G. Bruno, C. Cipriani // Advances in Neural Information Processing Systems 37. – 2024. – DOI: 10.52202/079017-1324.

18. Dhurandhar A. Trust Regions for Explanations via Black Box Probabilistic Certification / A. Dhurandhar, S. Haldar, D. Wei, K. Natesan R. // ICML 2024. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2402.11168.

References

1. GOST R 55184-2012. Hydraulic dampers of railway rolling stock. General specifications/approved by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 26.11.2012 No. 1163-st. / developed by the Open Joint-Stock Company Scientific and Design and Technological Institute of Rolling Stock (OJSC "VNIKTI") - III, 11 p.; 29 cm. - Text: immediate. [in Russian]

2. GOST 17053.1-80. AKSS-M ship shock absorbers. Specifications [Text]: state standard of the USSR / approved by Decree of the USSR State Standard of May 30, 1980 No. 2446. - Moscow: Standards Publishing House, 1980. - 18 p. [in Russian]

3. OST 1 03612-72. Dampers. Types and main parameters, technical requirements [Text]: industry standard. – 1972. - 9 p. [in Russian]

4. Ivanov, Nikolai Igorevich. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook/Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinova. - 5. - Moscow: Logos Publishing Group, 2020. - 432 p. - ISBN 978-5-98704-659-3: B. c. [in Russian]

5. EN 15129:2010. Anti-seismic devices [Text] : European Standard. – Brussels : CEN, 2010. – 171 p.

6. Sadek, F. Passive energy dissipation devices for earthquake-resistant buildings/F. Sadek, B. Mohraz, A. W. Taylor, R. M. Cheung. - November 1996. – 66 p. – (NISTIR-5923; PB97132054).

7. VDI 3830 «Damping of materials and members» : в 5 ч. / VDI-Gesellschaft Produkt und Prozessgestaltung. – URL: <https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-3830-blatt-1-damping-of-materials-and-members-classification-and-survey>. - Text: electronic.

8. Baz A. M. Active and passive vibration damping / Amr M. Baz. – Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc. , 2019. – xxxii, 719 p. – ISBN 978-1-118-48192-9.

9. Patent No. 32332 Republic of Kazakhstan, IPC B25J 11/00, F16F 13/00, F16F 15/00. Spatial shock-absorbing (damping) system: No. 2015/0711.1: application 14.09.2022; publ. 21.07.2023 /Bisembaev K., Orynbaeva N. S.; applicant and patent holder Non-profit joint-stock company "Shakarim University of Semey." - 5 p.: Ill. - Text: direct. [in Russian]

10. Zare Estakhraji S. I. A thorough comparison between measurements and predictions of the amplitude dependent natural frequencies and damping of a bolted structure / S. I. Zare Estakhraji, M. Wall, J. Capito, M. S. Allen // Journal of Sound and Vibration. – 2022. – Vol. 541. – Art. 117397. – DOI: 10.1016/j.jsv.2022.117397.

11. Shirai Y. Energy response of a passive variable friction damper and numerical simulation on the control effects for high rise buildings / Y. Shirai, K. Nakata, A. Toyooka // Structural Control and Health Monitoring. – 2022. – Vol. 29, iss. 12. – Art. e3124. – DOI: 10.1002/stc.3124.

12. Li Q.-Q. Characterization of Dynamic Mechanical Properties of Viscoelastic Damper Based on Physics Constrained Data Driven Approach / Q.-Q. Li, Z.-D. Xu, Y.-R. Dong, Z.-H. He // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2023. – Vol. 24. – Art. 2450071. – DOI: 10.1142/S0219455424500718.

-
13. Liu Q. Seismic Optimization of Fluid Viscous Dampers in Cable Stayed Bridges: A Case Study Using Surrogate Models and NSGA II / Q. Liu, Z. Liu, J. Zhao, Y. Lei // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – Art. 15(9):1446. – DOI: 10.3390/buildings15091446.
 14. Yucsan Y. A. Adjusting a torsional vibration damper model with physics informed neural networks / Y. A. Yucsan, F. A. C. Viana, L. Manin, J. Mahfoud // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 154. – Art. 107552. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107552.
 15. Milićević P. Data generation framework for inverse modeling of nonlinear systems in structural dynamics applications / P. Milićević, O. Altay // Acta Mechanica. – 2023. – Vol. 235. – P. 1493–1515. – DOI: 10.1007/s00707-023-03532-3.
 16. Hoffmann J. Machine learning in a data limited regime: Augmenting experiments with synthetic data uncovers order in crumpled sheets / J. Hoffmann, Y. Bar Sinai, L. M. Lee, J. Andrejevic // Science Advances. – 2019. – Vol. 5. – Art. eaau6792. – DOI: 10.1126/sciadv.aau6792.
 17. Bonfanti A. The Challenges of the Nonlinear Regime for Physics Informed Neural Networks / A. Bonfanti, G. Bruno, C. Cipriani // Advances in Neural Information Processing Systems 37. – 2024. – DOI: 10.52202/079017-1324.
 18. Dhurandhar A. Trust Regions for Explanations via Black Box Probabilistic Certification / A. Dhurandhar, S. Haldar, D. Wei, K. Natesan R. // ICML 2024. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2402.11168.