

УДК 534.833:004.896

Суррогатное моделирование на основе нейронных сетей для оптимизации геометрических параметров акустических метаматериалов

Свистов Владимир Евгеньевич

geekonchik@gmail.com

SPIN-код: 9190-8667

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается подход к автоматизированному проектированию низкочастотных акустических метаглушителей на основе резонансно-лабиринтных структур. С использованием метода конечных элементов (МКЭ) и метода латинского гиперкуба (LHS) сгенерирована обучающая выборка из 1000 конфигураций. Разработана суррогатная модель на базе глубокой нейронной сети, предсказывающая спектральные характеристики коэффициента звукопропускания с высокой точностью ($MSE = 0.017$). Для решения обратной задачи — синтеза геометрии по заданной резонансной частоте — применен стохастический алгоритм дифференциальной эволюции со встроенным механизмом частотного сканирования, обеспечивающим поиск физически устойчивых решений. Разработанный программный комплекс с графическим интерфейсом позволяет в режиме реального времени подбирать оптимальные параметры глушителя и автоматически генерировать параметризованные CAD-модели, что существенно ускоряет процесс инженерного акустического проектирования.

Ключевые слова: Акустический метаматериал, метаглушитель, машинное обучение, глубокие нейронные сети, дифференциальная эволюция, суррогатное моделирование, звукопропускание, обратная задача

Surrogate Modeling Based on Neural Networks for Optimization of Geometric Parameters of Acoustic Metamaterials

Svistov Vladimir Evgenyevich

geekonchik@gmail.com

SPIN-code: 9190-8667

BSTU «VOENMEKH» named after D.F. Ustinov

Abstract. The paper considers an approach to the automated design of low-frequency acoustic meta-mufflers based on resonance-labyrinthine structures. Using the finite element method (FEM) and Latin Hypercube Sampling (LHS), a training dataset of 1000 configurations was generated. A surrogate model based on a deep neural network was developed to predict the spectral characteristics of the transmission coefficient with high accuracy ($MSE = 0.017$). To solve the inverse problem — geometry synthesis for a given frequency — a differential evolution algorithm with a frequency scanning mechanism was applied. The developed software allows real-time selection of muffler parameters and CAD model generation.

Keywords: acoustic metamaterial, meta-muffler, machine learning, neural networks, differential evolution, surrogate modeling, inverse problem

Введение. Современные требования к снижению уровня шума в энергетических и транспортных установках диктуют необходимость поиска новых высокоэффективных решений. Традиционные реактивные и диссипативные глушители зачастую обладают значительными габаритами, что ограничивает их применение в низкочастотном диапазоне (до 1000 Гц). Решением данной проблемы является использование акустических метаматериалов (АММ), свойства которых определяются не химическим составом вещества, а их сложной внутренней геометрией.

Одним из наиболее перспективных направлений является создание резонансно-лабиринтных структур, которые позволяют реализовать механизмы локального резонанса в глубоком субволновом масштабе. Однако проектирование подобных устройств сопряжено с высокой вычислительной сложностью: классические методы оптимизации на основе прямого конечно-элементного моделирования требуют значительных временных затрат на итерационный перебор параметров. В данной работе предлагается использование суррогатных моделей на базе глубоких нейронных сетей для мгновенного предсказания акустического отклика и автоматического синтеза геометрии.

Материалы и методы. Объектом исследования является вентилируемый метаглушитель, сочетающий свойства резонаторов Гельмгольца и пространственных лабиринтных структур. Геометрия ячейки (рисунок 1) определяется набором варьируемых параметров: внешним и внутренним радиусами (R , r_{in}), углами наклона перегородок (α , θ), длиной каналов (h) и толщиной структуры (g). Принцип работы АММ основан на создании запрещенных зон (bandgap), в которых волновое число становится мнимым, что вызывает экспоненциальное затухание падающей волны.

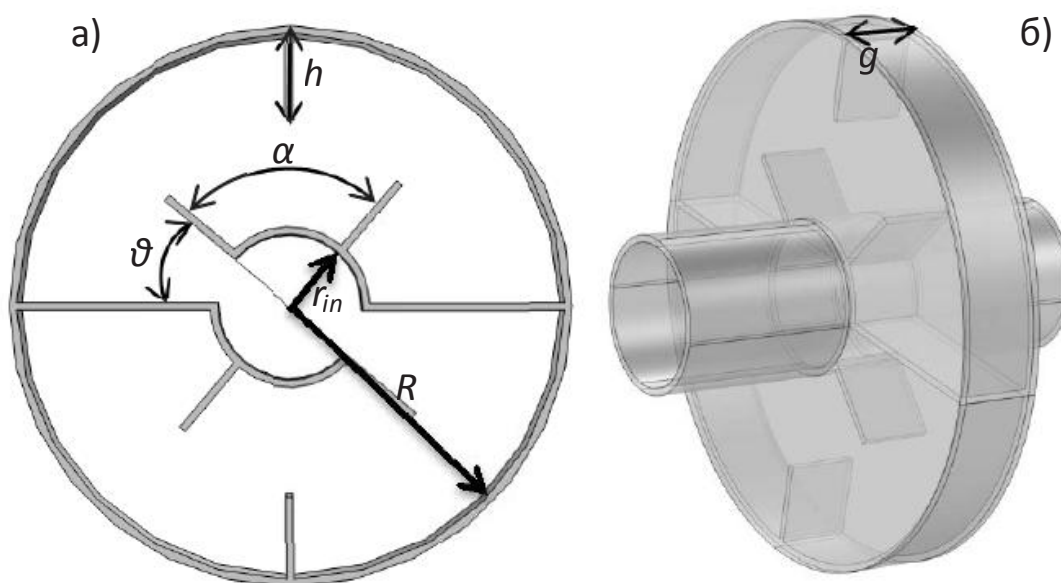


Рис. 1. Рассматриваемый метаглушитель:

a — поперечный срез внутреннего сечения; b — внешний вид геометрии

Для формирования обучающей выборки использовался метод латинского гиперкуба (LHS). Это обеспечило равномерное покрытие семимерного пространства геометрических параметров при объеме выборки в 1000 образцов (Диапазон изменения размеров представлен в таблице 1). Расчет каждой конфигурации проводился методом конечных элементов (МКЭ) в диапазоне частот 100...2000 Гц. В качестве основного выходного параметра был выбран коэффициент звукопропускания (T), представленный на графике. Это обусловлено спецификой работы акустических метаматериалов: в областях запрещенных зон значения потерь на передачу (TL) могут принимать экстремально высокие величины, что затрудняет их масштабирование и физическую интерпретацию. Кроме того, использование коэффициента T целесообразно для последующего обучения глубокой нейронной сети, так как значения в диапазоне от 0 до 1 легче поддаются нормализации, что упрощает процесс обучения и повышает точность предсказаний искусственного интеллекта.

Таблица 1

Диапазон изменений геометрических параметров для LHS

Параметр	R, мм	r_{in} , мм	α , °	θ , °	h, мм	g, мм
Диапазон изменений	60..80	20..30	50..90	30..50	15..30	15..30

Архитектура разработанной нейронной сети включает пять скрытых слоев (128, 128, 64, 64, 32 нейрона) с функцией активации ReLU, подобная структура позволяет модели на начальных этапах проводить широкомасштабное извлечение признаков и выявлять общие закономерности изменения акустических характеристик, в то время как последующие слои служат для их последовательного уточнения и декомпозиции. Обучение проводилось в течение 1000 эпох с использованием оптимизатора Adam и коэффициента регуляризации весов 10^{-6} .

Результаты. В ходе исследования была проведена оценка эффективности разработанной суррогатной модели и алгоритма оптимизации. Основные результаты разделены на этап прогнозного моделирования и этап решения обратной задачи синтеза.

Оценка точности суррогатной модели. Построенная глубокая нейронная сеть продемонстрировала высокую стабильность при аппроксимации нелинейных зависимостей коэффициента звукопропускания (T) от семи геометрических параметров. На тестовой выборке, не участвовавшей в обучении, достигнута среднеквадратичная ошибка (MSE) на уровне 0,017. Сравнение спектральных характеристик, полученных с помощью суррогатной модели (TAI) и контрольных расчетов методом конечных элементов (T_c), показало высокую степень корреляции (рисунок 2), что согласуется с результатами аналогичных подходов в проектировании акустических устройств [3, 5].

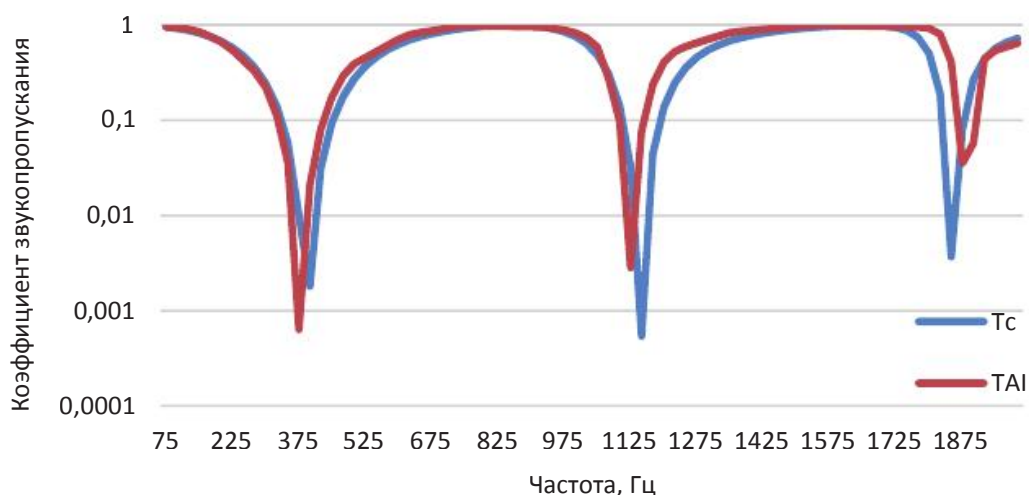


Рис. 2. Зависимость звукопропускания АММ, полученная конечно-элементным моделированием (Tc) и с помощью нейросети (TAI)

Синтез геометрии и решение обратной задачи. С использованием алгоритма дифференциальной эволюции была решена обратная задача синтеза геометрии ячейки для целевых частот резонанса: 350 Гц, 475 Гц и 700 Гц. Для каждой частоты алгоритм успешно подобрал конфигурацию лабиринтных каналов, минимизирующую звукопропускание (рис.3).

Валидация синтезированных моделей в среде конечно-элементного моделирования подтвердила точность метода. Установлено, что среднее отклонение целевой частоты резонанса в синтезированной геометрии от заданного значения составило не более 1,5%. Итоговая среднеквадратичная ошибка синтезированных решений составила 0,09. Данные результаты подтверждают эффективность предложенного метода частотного сканирования, позволяющего находить устойчивые решения даже в условиях высокой чувствительности резонансных систем к изменению геометрии [6, 7].

Программная реализация. Разработанный программный комплекс на базе библиотеки Streamlit позволил автоматизировать процесс проектирования. Время генерации оптимальной геометрии составило в среднем 4–7 секунд на стандартном ПК, что на три порядка быстрее выполнения прямого численного поиска с использованием МКЭ [4]. Инструмент обеспечивает автоматический экспорт данных в формате MPN, что позволяет бесшовно интегрировать результаты в производственный цикл изготовления опытных образцов методом аддитивных технологий.

Обсуждение. Ключевым преимуществом предложенного метода является внедрение механизма частотного сканирования в пределах $\pm 2\%$ от целевой точки. Это позволяет алгоритму игнорировать физически нестабильные резонансы и находить устойчивые решения, что крайне важно при наличии неопределенностей в параметрах. Использование нейронной сети в качестве быстрой функции оценки сокращает время подбора параметров с нескольких часов до нескольких секунд.

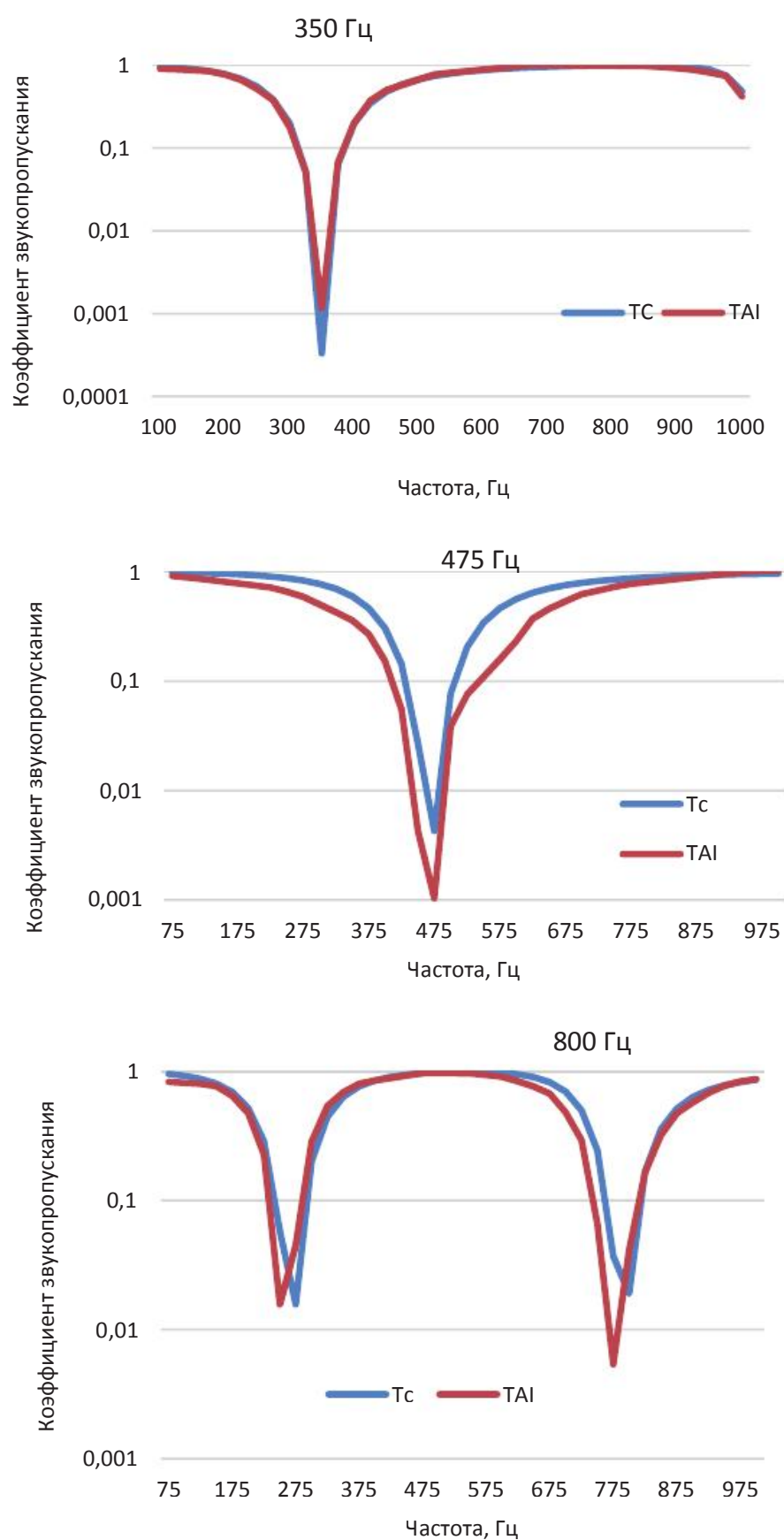


Рис. 3. Зависимость звукопропускания, полученная при решении обратной задачи (TAI) и при валидации с помощью конечно-элементного моделирования (Тс) для разных частот

Разработанный графический интерфейс на базе библиотеки Streamlit автоматизирует процесс взаимодействия с моделью. Система позволяет фиксировать габаритные размеры (R , g) и мгновенно получать результат синтеза в виде интерактивных графиков, таблиц и готовой CAD-модели в формате .mrph. Данный подход соответствует современным тенденциям генеративного проектирования и топологической оптимизации акустических систем.

В дальнейшем планируется комплексное совершенствование созданной программы и предсказательной модели. Основным вектором развития станет расширение обучающей выборки и алгоритмов для поддержки различных типов акустических метаматериалов, помимо рассмотренной резонансно-лабиринтной структуры. Кроме того, функционал программного комплекса будет дополнен возможностью проектирования и расчета многослойных акустических сэндвич-панелей на основе синтезированных мета-ячеек. Это позволит применять разработанный ИИ-подход не только для канальных глушителей, но и в задачах широкополосной звукоизоляции строительных и аэрокосмических ограждающих конструкций.

Заключение. В результате выполнения работы был успешно разработан автоматизированный программный комплекс для проектирования и оптимизации низкочастотных акустических метаглушителей. Использование суррогатной модели на базе глубокой нейронной сети позволило с высокой точностью аппроксимировать результаты ресурсоемкого конечно-элементного моделирования, сократив время оценки характеристик до долей секунды. Интеграция обученной нейросети со стохастическим алгоритмом дифференциальной эволюции и внедрение метода частотного сканирования обеспечили эффективное решение обратной задачи — синтеза физически устойчивых геометрических параметров конструкции под заданную целевую частоту. Созданный графический интерфейс с функцией автоматической генерации CAD-моделей делает разработанный инструмент удобным для практического инженерного применения.

Список источников

- [1] Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. Москва, Логос, 2015, 431 с.
- [2] An B.H., Lee J.W. Metamaterial-based muffler with broadband tunability in a limited space: optimal design, theoretical investigation and experiment. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, vol. 205, art. no. 106594. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106594>
- [3] An B.H., Lee J.W. Deep-learning-based generative design for optimal reactive silencers. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, vol. 284, art. no. 109736. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109736>
- [4] Hao-Bo Qi, Shi-Wang Fan, Mu Jiang. Low-frequency ultra-broadband ventilated muffler based on a resonance-labyrinthine metamaterial. Extreme Mechanics Letters, 2024, vol. 67, art. no. 102120. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2023.102120>

- [5] Lee D., Youn B.D., Jo S.H. Deep-learning-based framework for inverse design of a defective phononic crystal for narrowband filtering. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 255, art. no. 108474.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108474>
- [6] Lee J.K., Lee I., Lee J.W. Reliability-based acoustical topology optimization of mufflers under noise frequency and temperature uncertainties. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 160, art. no. 107854.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107854>
- [7] Zou Z., Liu J., Gao K., Chen D., Yang J., Wu Z. Inverse design of functionally graded porous structures with target dynamic responses. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, vol. 280, art. no. 109530.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109530>