

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

© Р. Ф. Галиев¹, А. Р. Мухутдинов²

¹ Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

В настоящее время математическое моделирование является неотъемлемой частью повседневной жизни большинства людей, однако пользователю предоставляется огромный выбор подходов к решению той или иной задачи, в большинстве случаев сложно решить и выбрать какой-то конкретный метод моделирования. В статье авторами были рассмотрены некоторые современные методы математического моделирования: метод искусственных нейронных сетей, эволюционное моделирование, графовый метод сетей Петри, метод конечных элементов, вейвлет-анализ, регрессионное моделирование. Данные методы в настоящее время не утратили своей актуальности и до сих пор способны оперативно и эффективно решать поставленные пользователем задачи. В процессе анализа методов моделирования, во-первых, были рассмотрены их основные особенности и области применения на примере научных трудов различных авторов книг и статей. Во-вторых, были рассмотрены достоинства и недостатки каждого метода. Исследование показало, что рассматриваемые методы имеют свою определённую область применения, с которой они справляются наилучшим образом. При этом метод искусственных нейронных сетей является наиболее универсальным и перспективным в области компьютерных технологий при моделировании сложных объектов и процессов, так как, помимо решения стандартных задач автоматизации моделирования, распознавания образов и выявления неточностей и ошибок, искусственные нейронные сети применяются в такой крайне востребованной области, как нейропрогнозирование. Эта область моделирования активно развивается, но пока требует корректировки методов для достижения максимальной точности прогнозирования результатов. Результаты анализа носят обзорный характер и расширяют знания в области математического моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, моделирование, сложный объект, искусственная нейронная сеть, объём данных, нейропрогнозирование, метод конечных элементов, вейвлет-анализ, регрессионный анализ, эволюционная модель.

Формат цитирования: Галиев Р. Ф., Мухутдинов А. Р. Модели, методы и средства экстремального регулирования массоэнергетических характеристик нестационарных объектов на основе декомпозиции управляющих воздействий // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2024. Том XX. № 4 (38). С. 13-22.

Введение. В современном мире, где информация играет главенствующую роль, растёт спрос на инструменты моделирования и их развитие из-за их высокой эффективности и скорости обработки информации при анализе данных и процессов. Среди методов системно-структурного и количественного анализа важное место занимают математические модели. Среди общего числа средств исследования модели являются «формой научной абстракции особого рода», обеспечивающей предметно-наглядное изображение скрытых закономерностей, особым средством символизации в научно-теоретическом мышлении. Кроме того, модель является отражением об-

щего в изучаемых явлениях, поэтому моделирование сложных объектов – не частный приём усвоения знаний, а один из общих методов познания, применяемых в самых различных областях [1].

Сложный объект, как и любая сложная система или процесс, представляют собой составной объект, который содержит большее количество динамических переменных, включает нелинейные взаимодействия и обратные связи, которые также содержат нелинейности. Для таких систем крайне трудно представить адекватное математическое описание. Поэтому для решения подобных задач необходимо разделять сложные объекты на подобъекты,

для которых возможно предложить математическую функцию, способную адекватно описать подобъект.

Рассмотрим математические методы моделирования сложных объектов, области их применения, рассмотрим достоинства и недостатки, примеры применения в различных областях науки и техники, а также выберем наиболее оптимальный и универсальный метод моделирования сложных физических процессов.

Основная часть. В настоящее время наиболее известным и перспективным инструментом математического моделирования считается искусственная нейронная сеть (ИНС). Крайне высокую популярность данный инструмент получил за счёт крайне востребованных и эффективных нейросетевых моделей как Midjourney, ChatGPT и их аналогов, которые способны выполнять огромное количество задач: выдавать глубокие и развёрнутые ответы на запросы пользователя, генерировать и обрабатывать текст в зависимости от поставленной задачи, создавать изображения по описанию, генерировать аудиофайлы и музыку, создавать простые коды и приложения по описанию от пользователя и многое другое. Такой обширный набор возможностей стал возможен за счёт машинного обучения нейронной сети на большом множестве примеров, генерируемых пользователями со всего мира.

Одной из областей применения нейронных сетей считается прогнозирование. Прогнозирование – это процесс по разработке прогнозной модели или расчёта прогноза, в результате которого можно получить предсказание грядущих изменений в значениях временного ряда по итогам его значений в прошлом. Данная возможность стала доступной за счёт главного достижения нейронных сетей: машинного обучения, которое не требует специальных возможностей и позволяет вмещать и анализировать огромные объёмы данных [2]. На сегодняшний день эта область является весьма распространённой и востребованной, поскольку упрощает процесс анализа большого объёма данных, а также позволяет заметить зависимости, ускользающие от взгляда человека.

В подтверждение вышеупомянутых воз-

можностей современных нейросетевых моделей рассмотрим работу [3], где описывается применение нейронной сети ChatGPT для генерации введения к научной статье, затрагивающей актуальную проблему современности. Поначалу кажется, что данный инструмент способен дать ответ на любой запрос и является универсальным, чему свидетельствуют многие источники. Но при дальнейшем рассмотрении выясняется, что ChatGPT не способен выдавать корректные ответы на вопросы, касающиеся социальных и политических проблем. Это связано с тем, что нейронная сеть не может выдавать новые идеи, она анализирует данные, уже имеющиеся в базах, и выдаёт результат анализа. Также нельзя отрицать, что с темами, имеющими обширную базу теоретических или экспериментальных данных, ChatGPT справляется успешно и имеет высокую точность.

В работе [4] авторы рассматривают возможность включения нейронной сети, которая обучалась на результатах измерений, для обработки и анализа результатов трёхдиапазонной сверхвысокочастотной радиометрической системы с целью краткосрочного прогнозирования метеопараметров приземного слоя атмосферы. Для обучения нейронной сети были отобраны результаты измерения метеопараметров влажности, температуры и интенсивности осадков, полученные от метеостанций. Применение нейронных сетей для подобных целей могло бы изменить подход к краткосрочному прогнозированию метеобстановки в разных частях планеты из-за оперативности отслеживания и реагирования на те или иные обстоятельства. В работе было выявлено, что сезон года оказывает влияние на результаты прогнозирования влажности и интенсивности осадков, что подразумевает необходимость дополнительной предварительной подготовки входных параметров. При этом по результатам исследования выявлена возможность включения нейронной сети для краткосрочного прогнозирования метеоданных.

Варианты применения ИНС в машиностроении и диагностике неисправностей приведены в работе [5]. Авторами рассматривает-

ся возможность применения нейронных сетей для диагностирования подшипников качения, которые часто выходят из строя в синхронных двигателях с постоянными магнитами (СДПМ), за счёт анализа механических колебаний. Внедрение подобного инструмента профилактики поломки приводной системы позволит обслуживать элементы двигателя и предотвратить выход из строя связанных компонентов. При тестировании было выявлено, что классический многослойный персептрон с двумя скрытыми слоями обеспечил наилучший результат в плане эффективности и отклонения от ожидаемых значений. Применение искусственных нейронных сетей в диагностике подшипников качения СДПМ позволяет оптимизировать и автоматизировать процесс диагностики, так как не требует профессиональных навыков и знаний в области синхронных двигателей и не требует математической модели.

В работе [6] предложено использование искусственных нейронных сетей в маркетингологии при распознавании успешности маркетолога в различных видах деятельности: менеджмент в рекламе, маркетинг в рекламе, копирайтинг и дизайн в рекламе. При этом данный инструмент направлен на помощь при оценке успешности маркетолога и получение рекомендации по выбору специализации.

Аналогично нейронным сетям, генетические алгоритмы возникли в результате наблюдения и попыток копирования естественных процессов, происходящих в мире живых организмов, в частности эволюции и селекции популяций живых организмов [7].

Эволюционное моделирование – это метод, который использует принципы эволюции для создания и развития моделей. Он основан на идее, что модели могут эволюционировать и приспосабливаться к изменяющимся условиям [8]. Эволюционное компьютерное моделирование применяется в задачах оптимизации программного обеспечения, генерации оптимальных тестовых наборов данных, оценке надежности программного обеспечения, кластеризации программного обеспечения на компоненты, выделении функциональности в виде

программного и аппаратного компонентов.

Методы эволюционного моделирования направлены на решение оптимизационных задач большой размерности через процесс комбинирования случайных и детерминированных факторов [9]. Эволюционное моделирование снимает проблемы необходимости структурного многоуровневого деления сложных систем на составные части – подсистемы с целью их раздельного модульного проектирования, а также полностью исключает процесс интеграции составных частей сложных систем и появление необъяснимых эффектов от использования комплексных решений [8]. Наряду с этим существует ряд недостатков метода, включая:

- неопределенность результатов. Эволюционные алгоритмы могут давать различные результаты при каждом запуске из-за случайного характера процесса эволюции. Это может затруднить интерпретацию и повторяемость результатов;

- зависимость от параметров. Эволюционные алгоритмы имеют множество параметров, которые нужно настроить для достижения оптимальных результатов. Неправильный выбор параметров может привести к низкой эффективности алгоритма;

- ограниченность применимости. Эволюционные алгоритмы могут быть неэффективными в некоторых типах задач или моделей. Они могут иметь проблемы со сходимостью или эффективностью в некоторых сценариях.

В работе [10] рассматривается идея оптимизации и частичной автоматизации процесса разработки Web-интерфейса посредством представления HTML-кода в виде древовидной хромосомы.

В научном труде [8] авторами говорится о том, что применение теории эволюционного моделирования позволило выявить проблемы в современных подходах экономических наук и концептуальное несовершенство существующих международных стандартов финансовой отчетности IAS и GAAP.

Так, в качестве математической модели, используемой для описания и анализа параллельных и распределённых систем [11], использу-

ются сети Петри. В настоящее время они нашли широкое применение в моделировании и анализе многих дискретных процессов, в особенности таких как производственные процессы, компьютерные сети, программные системы и многое другое. В работе [12] предлагается использовать аппарат вложенных гибридных сетей Петри, объединяющих формализмы гибридных и вложенных сетей Петри, вместо имитационного моделирования для моделирования процесса исследования экономических систем. Также в работе [13] предлагается использовать метод сетей Петри при моделировании технологических процессов сборки и механической обработки, для оптимальной диспетчеризации и управления ресурсами, оборудованием и рабочим временем.

Сети Петри позволяют описывать параллельное выполнение действий, контролировать состояние системы и анализировать её поведение. Большую популярность данная математическая модель приобрела из-за удачного представления различных типов объектов, присутствующих во многих моделируемых системах, и «событийным» подходом к моделированию [12]. Анализ результатов может сказать о том, какие действия происходят, какие состояния им предшествовали, какие состояния примет система после выполнения действия, в каких состояниях пребывала или не пребывала система, какие состояния в принципе недостижимы. В условиях равновероятного выбора срабатывания одного из нескольких возбуждённых переходов может возникнуть конфликтная ситуация, когда при выполнении перехода другие готовые к срабатыванию переходы становятся неактивными. После такого исхода активная сеть Петри может не достигнуть заданной маркировки. Таким образом в сети формируется конфликт между событиями, когда реализация одного может исключить реализацию другого. К недостаткам классических сетей Петри можно также отнести невозможность внешнего воздействия на процесс. Задаются только начальные условия, после чего функционирование сети протекает недетерминированно без возможности изменить последовательность срабатывания переходов,

то есть сориентировать процесс по направлению. Также к недостаткам относится один тип маркеров, присутствующих в сети: можно наблюдать протекание только одного процесса. Для решения этой проблемы были разработаны цветные или раскрашенные сети Петри, где имеются маркеры нескольких цветов. Существуют различные виды сетей Петри, позволяющие нивелировать отдельные недостатки. К достоинствам сети Петри можно отнести её наглядность и понятность для анализа и моделирования из-за графического представления структуры и её модульность, позволяющую разбивать сложные системы на более простые модули, что упрощает их понимание [11].

Метод конечных элементов (МКЭ) – основной метод современной вычислительной механики, составляющий основу для многих современных программных комплексов, необходимых для выполнения расчётов сложных инженерных объектов на вычислительных машинах. Метод позволяет произвести дискретизацию области изменения пространственных переменных путем разбиения с некоторой погрешностью на ряд неперекрывающихся подобластей простой формы, в пределах каждой из которых функция состояния объекта приближенно описывается однотипной линейной комбинацией конечного числа заранее выбранных базисных функций [14].

Благодаря современным вычислительным машинам метод позволяет автоматизировать расчёт механических систем. Среди достоинств метода можно выделить его гибкость: благодаря механизму разбиения на конечные элементы моделированию подлежат различные сложные конфигурации. Также метод конечных элементов обеспечивает высокую точность вычислений при условии детального разбиения на большое число конечных элементов. Метод позволяет учитывать различные граничные условия, что делает возможным моделировать процессы реальных ситуаций. Помимо достоинств у метода имеются некоторые недостатки, к ним относятся высокие требования к мощности вычислительных машин. При большом количестве разбиений объекта могут потребоваться значительные вычис-

лительные ресурсы, что повысит и затраты по времени вычисления. Не менее важными являются требования к пользователю, так как необходимы знания в области численного моделирования, и наличие специализированного программного обеспечения. У метода конечных элементов имеются ограничения на моделируемые процессы: для моделирования нелинейных материалов, динамических процессов или сложных деформаций может потребоваться уточнение модели либо же применение другого метода [15].

Метод конечных элементов является пространственным методом решения задач математической физики из-за своей универсальности и гибкости. Помимо решения задач гидродинамики, электромагнетизма, теплопроводности, метод применяется в протезировании при моделировании костной ткани. Данной теме была посвящена глава в работе [16]. Также, применяя МКЭ, рассматривался процесс кристаллизации расплавов и возможность создания устройства электромагнитного воздействия на жидкие металлы и сплавы с целью управления структурой кристаллизующегося слитка в статье [17]. Так, МКЭ, предложенный авторами в работе [18], использовался для получения распределения температурного поля по поверхности исследуемого объекта, состоящего из трех частей, с помощью нахождения уравнения теплопроводности. Использование МКЭ, представленного авторами в работе [19], позволяет визуально представить деформацию машины при асимметричном ударе, решать задачи проектирования надежных креплений для специализированного транспорта (прочностной расчет кронштейн с двумя ребрами жесткости и одним отверстием для крепления к потолку). МКЭ находит эффективное применение в биомеханических процессах. Авторами в работе [20] МКЭ используется для подбора типа фиксации тазового кольца при различных его повреждениях.

Вейвлет-анализ – это метод анализа сигналов и данных, основанный на использовании вейвлет-функций. Термин «вейвлет» в дословном переводе означает «маленькая волна», сама вейвлет-функция состоит из волнообраз-

ных функций, способных к сжатию и растяжению во времени [21]. Они (функции) обладают свойством локализации как во временной, так и в частотной областях.

В настоящее время вейвлет-анализ широко применяется не только в анализе и обработке числовых рядов физических, геофизических результатов экспериментов и наблюдений, сжатии и восстановлении информации в одномерных и многомерных сигналах, сжатии двумерной информации и видеосигнала, но и при прогнозировании курса ценных бумаг, социологии, диагностике в медицине, в квантовой физике для изучения строения атома, для обнаружения подводных лодок и оценки разрушения, произведённых бомбардировок. В работе [22] авторами статьи предлагается использование алгоритмов на основе вейвлет-анализа для решения основных проблем обработки данных лазерного сканирования автомобильных дорог: фильтрация шумов и удаления избыточной информации. Также в работе [23] авторы статьи затрагивают тему трудностей с наличием отечественного программного комплекса для работы с сигналами, на замену ушедшим программным комплексам предлагается свой, способный обеспечивать обработку сигналов с применением метода вейвлет-анализа в реальном масштабе времени и сопоставимым по эффективности с другими иностранными пакетами.

Вейвлет-анализ представляет собой использование математических функций, называемых вейвлетами. Они являются короткими и ограниченными по времени функциями, соответствующими участку сигнала, которые для последующего анализа сжимаются или растягиваются. Рассмотрение участка сигнала при детальном изучении необходимо для фиксирования влияния событий на мелких масштабах, способных перерасти в крупномасштабные явления, также и отдалённое рассмотрение позволяет не упустить явление, происходящее на глобальном уровне [21].

В заключение стоит отметить некоторые достоинства и недостатки вейвлет-анализа. Благодаря анализу данных при разном уровне масштабирования вейвлет-анализ позволяет

получить более детальную и полную информацию об объекте. Существенным достоинством является адаптивность и универсальность метода. При правильном подборе базисной функции – вейвлета – и использовании быстрых алгоритмов повышается эффективность вычислений и тем самым ускоряется процесс обработки и анализа данных. Но в этом же заключается сложность: существует большое количество базисных функций, и выбор наиболее подходящей может стать непростой задачей. А ошибка при выборе вейвлета приведёт к неверным результатам. Также интерпретация полученных результатов требует определённых навыков и опыта, неподготовленному пользователю будет трудно интерпретировать результаты анализа – коэффициенты вейвлет-преобразования. Немаловажным условием получения достоверных данных при вейвлет-анализе является отсутствие шумов в данных из-за чувствительности. Необходимо предварительно обрабатывать данные для исключения искажения результата. Несмотря на имеющиеся недостатки, методы анализа структуры сигналов, основанные на вейвлет-преобразовании, являются мощным инструментом для анализа звуковых сигналов, исследования радиофизических систем, исследования сигналов биологических систем, при анализе объектов в механике твёрдого тела и многих других видов сигналов. Развитие техники и создание более точных инструментов анализа позволяет исследовать сигналы, выявляющие детали из сложных структур.

Регрессионный анализ является разделом математической статистики, объединяющим практические методы исследования регрессионной зависимости между величинами на основе статистической информации. Данные, используемые при регрессионном анализе, могут быть неточными или неоднозначными. Неопределенность исходных данных может вытекать из случайности или из нечеткости. Классический четкий регрессионный анализ позволяет решать задачи обработки данных, представленных действительными числами. Однако на практике исходные данные могут быть представлены в лингвистическом виде,

в виде булевых переменных или интервальных значений. Методы нечеткой регрессии основаны как на теории вероятностей, так и на теории нечетких множеств. При вероятностном подходе для учета неопределенности используются случайные величины. Целью использования случайных величин является включение в математическую модель множества значений неточных (неоднозначных) исходных данных и вероятностей этих значений. При нечетко-множественном подходе для учета неопределенности используются нечеткие числа, а целью использования нечетких чисел является возможность учесть расплывчатость, неопределенность значений исходных данных [24].

В статье [25] рассматривается метод моделирования, основанный на теории нечетких множеств, который дает более широкие возможности для анализа экономических процессов в задачах управления аграрным производством.

Заключение. Анализ научной литературы, посвященной отдельным методам математического моделирования: эволюционное моделирование, сети Петри, метод конечных элементов (МКЭ), вейвлет-анализ, регрессионное моделирование, искусственные нейронные сети (ИНС), позволяет сделать вывод, что метод искусственных нейронных сетей в настоящее время является наиболее перспективным и гибким инструментом математического моделирования, позволяющим работать с большими объемами разнородной и неполной информации, и решать нетрадиционные задачи за короткое время.

Среди методов моделирования, использующих машинное обучение, наряду с искусственными нейронными сетями выделяют и регрессионные методы моделирования. Для задач с большим набором данных с нелинейной зависимостью более предпочтительным методом моделирования, использующим машинное обучение, являются нейронные сети благодаря более высокой точности при прогнозировании и склонности к переобучению. Регрессионные методы просты и эффективны, но при работе с большими объемами данных уступают ней-

ронным сетям в точности. В свою очередь, эволюционное моделирование применяется в качестве инструмента оптимизации, поскольку эффективно находит наиболее оптимальный и жизнеспособный вариант решения, основанный на принципах естественного эволюционного процесса. Для оптимизации процесса создания рабочей и качественной сети используются генетические алгоритмы, являющиеся разновидностью эволюционного моделирования. Развитие методов привело к их тесному взаимодействию между собой: генетические алгоритмы для обучения нейронной сети (эволюционное обучение нейронной сети), выбор топологии нейронной сети с помощью генетического алгоритма (эволюционный подбор топологии сети), нейронные сети для решения оптимизационных задач с подбором весов через генетический алгоритм, реализация генетического алгоритма с помощью нейронной сети. Взаимодействие методов позволяет решать сложные задачи и применять сложные архитектуры нейронных сетей. Хотя оба метода моделирования могут применяться в задачах прогнозирования, искусственные нейронные сети справляются с этой задачей эффективнее, а эволюционное моделирование обычно используется в качестве оптимизатора. Ещё одним рассмотренным методом математического моделирования является МКЭ, или конечно-элементный анализ, который представляет собой численный метод приближенного решения граничных задач и применяется в механике твёрдого деформируемого тела, теплообмене, гидродинамике и других областях техники. Применение данного метода в прогнозировании

результатов деформации и прочности твёрдого тела возможно и применяется на практике, в то время как использование метода для прогнозирования параметров из области газодинамики не распространено для метода конечных элементов, с этой задачей справится обученная нейронная сеть. Применение вейвлет-анализа для прогнозирования результатов в различных областях знаний, науки и техники возможно, но встречаются трудности с интерпретацией результатов. Хорошо обученные нейронные сети предоставляют данные, которые не нужно интерпретировать. Также метод вейвлет-преобразований уступает в точности искусственным нейронным сетям. Следует также отметить, что недостаточная развитость аппарата сетей Петри делает их неэффективным инструментом для прогнозирования протекания сложных физических процессов. Прогнозирование с применением сетей Петри применяется при оптимизации бизнес-процессов, они отличаются от моделирования физических процессов своим выверенным алгоритмом и предсказуемостью результата.

Таким образом, ИНС в настоящее время имеют больше возможностей и являются более универсальным инструментом с высоким уровнем точности выдаваемых результатов, не нуждаются в предварительной обработке данных для выявления характерных признаков этих данных. ИНС хорошо справляются с большими объёмами данных, способны фиксировать сложные паттерны, которые сложно выявить традиционными методами. Нейросетевое моделирование имеет мощный и развитый математический аппарат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быкова Н. П. Графовое моделирование структур решений задач как средство их систематизации // Математические структуры и моделирование. 2004. Вып. 4. С. 128-139.
2. Морозова В. И., Логунова Д. И. Прогнозирование методом машинного обучения // Молодой учёный. 2022. № 21 (416). С. 202-204. URL: <https://moluch.ru/archive/416/92048/> (дата обращения: 26.03.2024).
3. Зашихина И. М. Подготовка научной статьи: справится ли ChatGPT? // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. № 8-9. С. 24-47.
4. Федосеева Е. В., Ростокин И. Н., Щукин Г. Г., Ростокина Е. А., Матюков М. А., Холодов И. Ю. Нейронная сеть в задачах краткосрочного прогнозирования по результатам микроволнового радиометрического зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 3. С. 20-28. ISSN 2221-2574.

5. Саксонов Е. А., Симонов С. Е., Городничев М. Г., Мосева М. С. Анализ неисправностей синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе мониторинга вибрации с использованием нейронных сетей // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. №2 (58). С. 141-153. ISSN 2074-1707.
6. Азарнова Т. В., Аснина Н. Г., Демидова А. С., Ярышина В. Н. Применение нейросетевых механизмов для прогнозирования успешности маркетологов в различных видах деятельности на рынке труда // Вестник Воронежского государственного университета. 2017. №3. С. 78-87.
7. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы/Пер. с польск. Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с. ISBN 5-93517-103-1.
8. Хохлова М. Н. Теория эволюционного моделирования. Москва: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2004. 67 с. ISBN 5-87911-115-6.
9. Матчин В. Т. Применение эволюционного моделирования для регенерации программного обеспечения // Образовательные ресурсы и технологии. 2019. №4. С. 42-52.
10. Кольчугина Е. А., Заваровский К. В. Применение методов генетического программирования к разработке web-интерфейсов // Прикладная информатика. 2012. №5 (41). С. 64-74.
11. Мальков М. В., Малыгина С. Н. Сети Петри и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. №3 (3). С. 35-40.
12. Скородумов П. В. Моделирование экономических систем с помощью аппарата сетей Петри // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2014. №4 (34). С. 253-259.
13. Мартынов В. Г., Масагин В. Б. Применение сетей Петри при моделировании управления технологическими процессами сборочного производства // Омский научный вестник. 2014. №1 (127). С. 134-137.
14. Каменев С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие. Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2019. 110 с.
15. Акимов П. А., Мозглаева М. Л. Многоуровневые дискретные и дискретно-континуальные методы локального расчёта строительных конструкций: монография. Москва: МГСУ, 2014. 632 с. ISBN 978-5-7264-0907-8.
16. Advances in Biomedical Engineering/Zbigniew Nawrat, Maitthieu De Beule, Vicente Zarzoso [и др.] – Elsevier B. V., 2009. 281 с. ISBN 978-0-444-53075-2.
17. Сидоров О. Ю., Саранулов Ф. Н. Применение методов конечных элементов и конечных разностей для моделирования кристаллизации расплавов в переменном магнитном поле // Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭЭТ-2017: Сборник научных трудов. 2017. Т. 2. С. 47-50.
18. Шидловский С. В. Математическое моделирование сложных объектов с распределёнными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2006. Т. 309. №8. С. 19-23. eISSN 2413-1830.
19. Вергазова О. Б., Королев Е. А. Применение метода конечных элементов для решения технических задач // Modern European Researches. 2021. Т. 1. №2. С. 76-81. ISSN 2311-8806.
20. Дубров В. Э., Зюзин Д. А., Кузькин И. А. и др. Применение метода конечных элементов при моделировании биологических систем в травматологии и ортопедии // Российский журнал биомеханики. 2019. Т. 23. №1. С. 140-152. ISSN 2409-6609.
21. Павлов А. Н. Вейвлет-анализ и примеры его применения // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. №5. С. 99-111.
22. Шумилов Б. М., Байгулов А. Н., Абдыкалык-кызы Ж. Алгоритм и программа вейвлет-моделирования поверхностей автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. №1 (42). С. 142-152. ISSN 1607-1859.
23. Земцов А. Н., Чан З. Х. Реализация вейвлет-преобразований в пакете анализа данных // Цифровая экономика. 2023. №2 (23). С. 51-57. ISSN 2686-956X.
24. Лабинский А. Ю. Нечетко-множественный подход к построению регрессионной модели // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Госу-

дарственной противопожарной службы МЧС «России». 2019. № 3. С. 36-41. eISSN 2218-130X.

25. Парфенова В. Е. Нечеткое регрессионное моделирование в задачах управления аграрным производством // Инновации. 2019. № 7 (249). С. 88-92. ISSN 2071-3010.

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES OF MODELING COMPLEX OBJECTS

© Rinat F. Galiev¹, Aglyam R. Mukhutdinov²

¹*Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Kazan, Russia*

²*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

Now mathematical modeling is an integral part of daily life of the most people. However, the user is provided with a huge choice of approaches for solving a particular problem; thus, in most cases it is difficult to select a specific method of modeling. The article addresses modern methods of mathematical modeling such as method of artificial neural network (ANN), evolutionary modeling, Petri nets modeling, finite-element method, wavelet analysis, and regression modeling. Currently they have not lost their relevance and are still able to solve the problems set by the user quickly and effectively. When analyzing modeling methods, firstly, their main features and applications were reviewed using scientific papers and articles of various authors as an example. Secondly, the advantages and disadvantages of each method were considered. The study has shown that the methods under consideration have their own specific fields of application with which they cope best. Note that the method of artificial neural networks appears to be the universal and promising in the field of computer technologies in modeling complex objects and processes; in addition to solving typical problems of modeling automation, pattern recognition and revealing of discrepancies and errors, ANN is applied in such most-demanded field as neuroprediction. This field of science is being intensively developed, but still requires adjustment of techniques to achieve maximum predicting accuracy. The presented results are useful in expanding knowledge in the field of mathematical modeling.

Keywords: mathematical model, modeling, complex objects, artificial neural network, amount of data, neuroprediction, Finite Element Method, wavelet analysis, regression analysis, evolutionary model.

REFERENCES

1. Bykova, N. P. (2004), “Graph modeling of problem solution structures as a means of their systematization”, *Mathematical structures and modeling*, №4, pp. 128-139.
2. Morozova, V. I. and Logunova, D. I. (2022), “Machine learning forecasting”, A young scientist, available at: <https://moluch.ru/archive/416/92048/>
3. Zashikhina, I. M. (2023), “Preparation of a scientific article: will ChatGPT cope?” *Higher education in Russia*, №8-9, pp. 24-47.
4. Fedoseyeva, E. V., Rostokin, I. N., Shchukin, G. G., Rostokina, E. A., Matyukov, M. A. and Kholodov, I. Yu. (2023), “Neural network in short-term forecasting tasks based on the results of microwave radiometric sensing of the atmosphere”, *Radio engineering and telecommunication systems*, №3, pp. 20-28.
5. Saksonov, E. A., Simonov, S. E., Gorodnichev, M. G. and Moseva M. S. (2022), “Fault analysis of synchronous motors with permanent magnets based on vibration monitoring using neural networks”, *Caspian Journal: Management and High Technologies*, №2 (58), pp. 141-153.
6. Azarnova, T. V., Asnina, N. G., Demidova, A. S. and Yaryshina, V. N. (2017), “The use of neural network mechanisms to predict the success of marketers in various types of activities in the labor market”, *Proceedings of Voronezh State University*, №3, pp. 78-87.
7. Rutkovskaya, D., Pilinskiy, M. and Rutkovskiy L. (2006), *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems*. Translation from Polish., Hotline-Telecom, Moscow, 452 p.

8. Khokhlova, M. N., (2004), *Theory of evolutionary modeling*. TSNIATOMINFORM, Moscow, 67 p.
9. Matchin, V. T., (2019), "Application of evolutionary modeling for software regeneration", *Educational resources and technologies*, №4, pp. 42-52.
10. Kolchugina, E. A. and Zavarovskiy, K. V. (2012), "Application of genetic programming methods to the development of web interfaces", *Journal of Applied Informatics*, №5 (41), pp. 64-74.
11. Malkov, M. V. and Malygina, S. N., (2010), "Petri nets and modeling", *Proceedings of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*, №3 (3), pp. 35-40.
12. Skorodumov, P. V. (2014), "Modeling of economic systems using the apparatus of Petri nets", *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, №4 (34), pp. 253-259.
13. Martynov, V. G. and Masyagin, V. B. (2014), "The use of Petri nets in modeling the control of technological processes of assembly production", *Scientific Journals of OMSTU*, №1 (127), pp. 134-137.
14. Kamenev, S. V., (2019), *Fundamentals of the finite element method in engineering applications*, Orenburg State University, Orenburg, 110 p.
15. Akimov, P. A. and Mozglayeva, M. L., (2014), *Multilevel discrete and discrete-continuous methods of local calculation of building structures: monograph*, MGSU, Moscow, 632 p.
16. Zbigniew, N., Maitthieu De Beule., Vicente Zarzoso [and others] (2009), *Advances in Biomedical Engineering*, Elsevier B. V, 281 p.
17. Sidorov, O. Yu. and Sarapulov, F. N., (2017), "Application of finite element and finite difference methods for modeling the crystallization of melts in an alternating magnetic field", *Actual problems of electromechanics and electrical technologies APEET-2017: collection of scientific papers*, Ural Federal University, Ekaterinburg, pp. 47-50.
18. Shidlovskiy, S. V. (2006), "Mathematical modeling of complex objects with distributed parameters in problems of automatic control of structurally tunable systems", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, №8, pp. 19-23.
19. Vergazova, O. B. and Korolev, E. A. (2021), "Application of the finite element method to solve technical problems", *Modern European Researches*, №2, pp. 76-81.
20. Dubrov, V. E., Zyuzin, D. A., Kuzkin, I. A. [and others], (2019), "Application of the finite element method in modeling biological systems in traumatology and orthopedics", *Russian Journal of Biomechanics*, №1, pp. 140-152.
21. Pavlov, A. N. (2009), "Wavelet analysis and examples of its application", *News of higher educational institutions. Applied Nonlinear Dynamics*, №5, pp. 99-111.
22. Shumilov, B. M., Baygulov, A. N. and Abdykalyk-kyzy, Zh. (2014), "Algorithm and program for wavelet modeling of highway surfaces", *Journal of Construction and Architecture*, №1 (42), pp. 142-152.
23. Zemtsov, A. N. and Chan, Z. Kh. (2023), "Implementation of wavelet transformations in a data analysis package", *The digital economy*, №2 (23), pp. 51-57.
24. Labinskiy, A. Yu. (2019), "A fuzzy-multiple approach to building a regression model", *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*, №3, pp. 36-41.
25. Parfenova, V. E., (2019), "Fuzzy regression modeling in agricultural production management tasks", *Innovations*, №7 (249), pp. 88-92.