

ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров, А.И. Сулов (ФГАОУ ВО «ПНИПУ»),
И.Н. Грибков, А.С. Плешивых (АО «ОДК-Авиадвигатель»)

Рассматривается перспектива интеграции нейросетевой математической модели в состав лабораторного комплекса для полунатурных испытаний системы автоматического управления сложными техническими объектами двигателестроения. Раскрываются предполагаемые перспективы и преимущества использования нейросетевых моделей в технологии модельно-ориентированного проектирования. Представлена базовая архитектура нейронной сети, которая позволяет в значительной мере сократить процедуру поиска параметров архитектуры нейронной сети и получения нейросетевых моделей на примере газотурбинных электростанций.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, математическая модель, испытания, стенд, модельно-ориентированное проектирование, газотурбинная электростанция, программный комплекс.

Введение

Сложный технический объект характеризуется множеством взаимодействующих элементов, имеющих специфические свойства, такие как нелинейность, гетерогенность, стохастичность, неопределенность. Примерами сложных технических объектов в двигателестроении являются непосредственно газотурбинные двигатели (ГТД) [1 - 2], энергетические и транспортные газотурбинные установки [3], а также специализированные испытательные комплексы для имитации требуемых входных термогазодинамических параметров [4]. При создании и испытаниях систем управления сложными техническими объектами отмечается тенденция значительного усложнения как аппаратной, так и программной составляющих. Определение принципов работы системы, видов отказов и их последствий требует применения специальных аналитических методов, составляющих основу технологии модельно-ориентированного проектирования (МОП) [5].

Полунатурная испытательная установка

Основная идея МОП состоит в том, что в традиционной схеме системы автоматического управления (САУ) «объект управления - управляющее устройство» объект управления заменяется специализированным программно-аппаратным комплексом - модулем математической модели объекта управления. На этой основе строятся полунатурные испытательные установки (рис. 1). При этом в испытываемой САУ

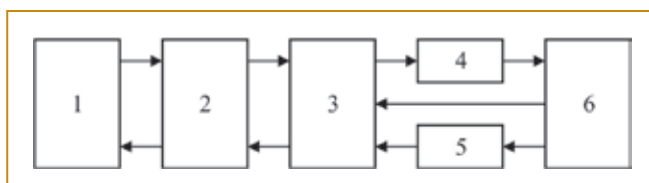


Рис. 1. Полунатурный испытательный стенд, где 1 – система автоматизации испытаний ГТД; 2 – модуль имитации отказных ситуаций; 3 – модуль верификации сигналов; 4 – модуль обработки входных сигналов; 5 – модуль обработки выходных сигналов; 6 – модуль математической модели технологического комплекса

устройство управления (УУ) – натурное, а объект управления – модель.

Принцип работы модуля математической модели объекта заключается в том, что модель объекта получает сигналы от управляющего устройства, выполняет расчет выходных переменных по заложенным уравнениям объекта управления и передает их обратно в управляющее устройство. Такой подход дает возможность испытать управляющее устройство во всей совокупности основных режимов работы рассматриваемого объекта, что в значительной степени снижает трудоемкость и временные затраты последующих натурных испытаний. Поэтому роль математической модели сложного технического объекта в составе установки (рис. 1) весьма важна.

При испытаниях системы автоматического управления сложными техническими объектами в состав модуля математической модели должны быть включены все составляющие элементы сложного технического объекта. Так, например, для газотурбинной электростанции (ГТЭС) построенной на базе конвертированного ГТД, в состав модуля надлежит включить не только модель конвертированного ГТД, но и модель электрогенератора, модели элементов электрической нагрузки, модель внешней электрической системы, модели электростанций, работающих параллельно с рассматриваемой системой. Это существенно усложняет модель, делает её многоэлементной, требует совместного моделирования отдельных элементов и воспроизведения сложных переходных процессов.

Существует несколько способов построения таких многоэлементных моделей. Традиционный подход [6] заключается в использовании уравнений, построенных на основе физических соотношений, но быстрое действие полученной математической модели не отвечает возможностям испытаний из-за больших затрат времени на моделирование. Построение моделей по уравнениям регрессии на основе идентификации ограничивает область адекватности таких моделей и требует больших затрат времени теперь уже на создание таких моделей для каждого отдельного режима

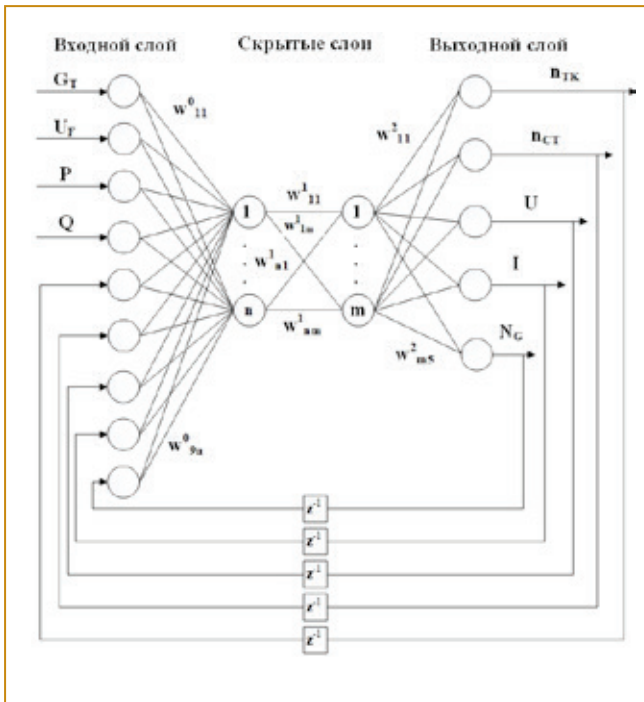


Рис. 2. Базовая архитектура нейронной сети для моделирования ГТЭС и ЭС, где n_{TK} – частота вращения турбокомпрессора; $n_{СТ}$ – частота вращения свободной турбины; U – напряжение синхронного генератора (СГ); I – ток СГ; N_G – вырабатываемая мощность СГ; G_T – расход топлива; U_F – напряжение обмотки возбуждения; P – активная мощность нагрузки сети; Q – реактивная мощность нагрузки сети; w_{bc}^a – весовой коэффициент связи (a – индекс таблицы весов, b – номер нейрона в слое, откуда идет связь, c – номер нейрона в слое, куда приходит связь).

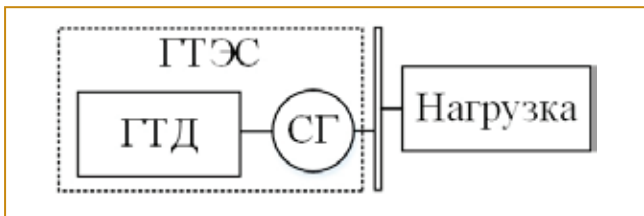


Рис. 3. Схема ГТЭС, работающей на нагрузку

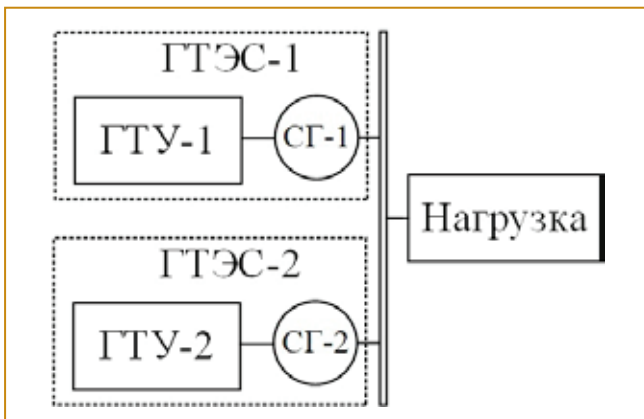


Рис. 4. Схема двух ГТЭС параллельно работающих на нагрузку

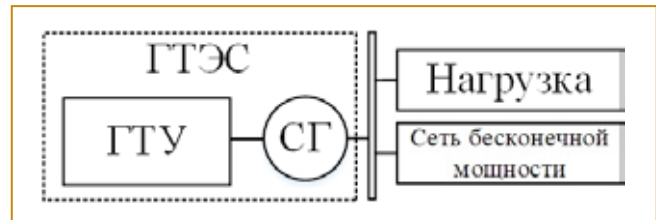


Рис. 5. Схема ГТЭС, работающей на нагрузку параллельно сети бесконечной мощности

работы. Поэтому предлагается возложить задачу построения модели сложного технического объекта на искусственную нейронную сеть (ИНС).

Нейросетевая модель сложного технического объекта на примере ГТЭС

Разработка нейросетевых математических моделей (НСММ) сложного технического объекта, обладающего значительным числом элементов и взаимосвязей между ними, показана на примере ГТЭС.

Нейросетевые математические модели [7, 8] объекта управления синтезируются в ходе обучения ИНС на специально полученных экспериментальных данных. В ходе выполнения исследований по возможности использовать ИНС для моделирования ГТЭС и ЭС [9] получены следующие результаты:

- 1) разработана методика проведения эксперимента, которая определяет необходимое множество экспериментальных данных и порядок проведения эксперимента для обеспечения его репрезентативности;
- 2) разработан программный комплекс (ПК) «НейроДин», который позволяет на основе экспериментальных данных получать нейросетевые математические модели ГТЭС и ЭС;
- 3) получена и испытана базовая архитектура нейронной сети (АНС).

Рассмотрим базовую архитектуру нейронной сети (рис. 2):

- 1) два скрытых слоя; число нейронов в обоих скрытых слоях равно 30 ед. ($n = m = 30$);
- 2) 30 нейронов в каждом скрытом слое;
- 3) пять моделируемых переменных;
- 4) глубина обратных связей равна двум;
- 5) четыре нейрона во входном слое (без учета обратных связей);
- 6) функция активации имеет вид гиперболического тангенса.

Параметры ИНС могут различаться в зависимости от объема экспериментальных данных, числа входных/выходных переменных и т.д. Полученная базовая архитектура нейронной сети позволяет в значительной мере сократить временные затраты на процедуру поиска параметров для различных нейросетевых моделей. Методика получения экспериментальных данных и базовая архитектура нейронной сети доказали свою состоятельность при получении нейросетевых моделей ГТЭС и энергосистемы (ЭС)

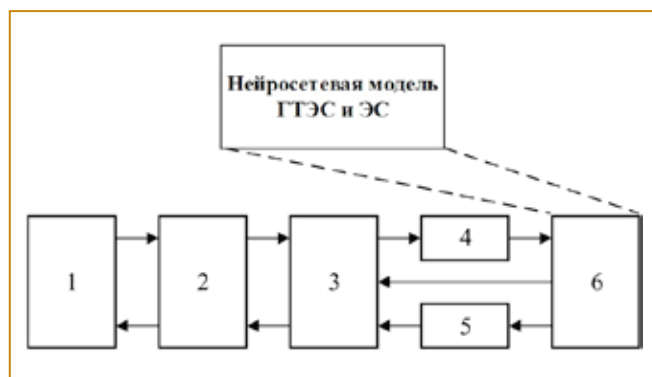


Рис. 6. Интеграция нейросетевой модели ГТЭС и ЭС в состав испытательного стенда

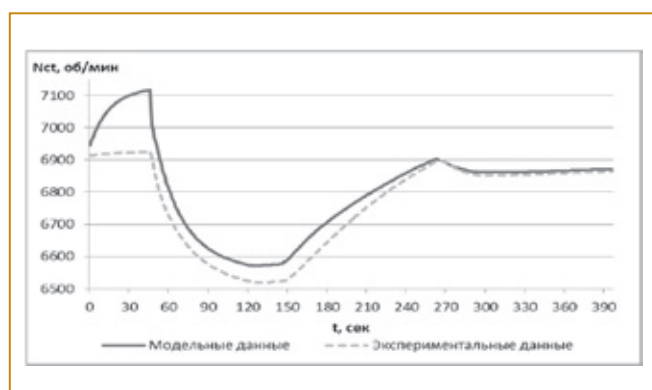


Рис. 7. Изменение скорости вращения свободной турбины в замкнутом контуре с работающей САУ для режима наброса нагрузки с 1000 до 2000 кВт (ГТЭС работает на выделенную нагрузку параллельно с сетью бесконечной мощности)

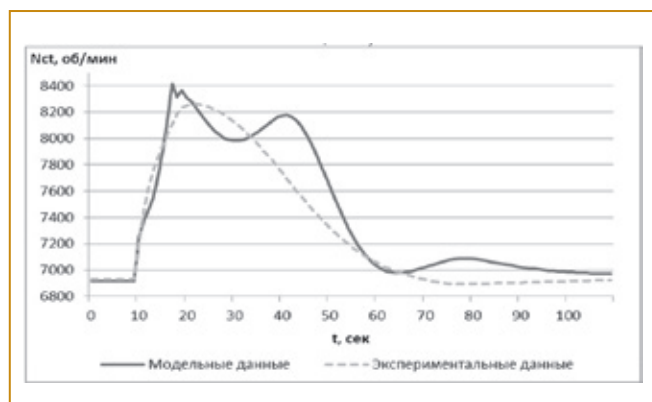


Рис. 8. Изменение скорости вращения свободной турбины в замкнутом контуре с работающей САУ для режима сброса нагрузки с 6000 до 1000 кВт (ГТЭС работает на выделенную нагрузку)

различных конфигураций и состава структурных элементов. На рисунках для примера показаны:

- 1) ГТЭС работает на нагрузку (рис. 3);
- 2) две ГТЭС параллельно работают на нагрузку (рис. 4);
- 3) ГТЭС работает на нагрузку параллельно сети бесконечной мощности (рис. 5).

Таблица. Адекватность по критерию Тейла

Схема энергоснабжения	Мера адекватности
ГТЭС работает на выделенную нагрузку	0,0129
ГТЭС работает на выделенную нагрузку параллельно с сетью бесконечной мощности	0,005

Перспектива и возможности нейросетевого моделирования для полунатурного моделирования

Преимуществом использования НСММ ГТЭС в составе испытательной установки для полунатурных испытаний систем автоматического управления сложными техническими объектами в двигателестроении (рис. 6) заключается в том, что можно разработать модель, которая учитывает не только различные режимы функционирования (многорежимную) [10], но и различные схемы электроснабжения (рис. 3 - 4).

Интеграция НСММ ГТЭС в состав существующей лабораторной установки (рис. 1) потребует доработки в области интерфейсов, так как на текущий момент стенд может работать только с моделями, которые соответствуют интерфейсам ГТД.

На рис. 7 и рис. 8 показано сравнения экспериментальных и модельных данных нейросетевой математической модели ГТЭС и ЭС, учитывающей схемы электроснабжения, представленных на рис. 3 и рис. 5. В таблице показана мера адекватности модели в замкнутом контуре.

Таким образом с развитием теории искусственных нейронных сетей становится возможным использовать в составе лабораторной установки для полунатурных испытаний НСММ сложных технических объектов двигателестроения.

Заключение

На примере ГТЭС разработана методика проведения экспериментов для получения экспериментальных данных, которая в совокупности с ПК «Нейро-Дин» и базовой архитектура нейронной сети позволяет значительно упростить процедуру получения нейросетевых моделей сложными техническими объектами.

Показана возможность использования НСММ в составе испытательной установки для полунатурных испытаний систем автоматического управления сложными техническими объектами. Однако текущая установка (рис. 1) потребует доработки, для встраивания в него нейросетевой модели ГТЭС и ЭС (рис. 6), но это все относится к задачам технического характера, и возможность использования установки для испытания САУ ГТД в составе ГТЭС в дальнейшем потребует подтверждения.

Анализ полученных результатов дает возможность предположить, что, используя только одну ИНС, возможно моделировать большинство режимов функционирования ГТЭС и ЭС, а также

моделировать её различные структурные схемы. Поэтому в перспективе применение ИНС открывает дополнительные возможности и позволяет получить универсальную нейросетевую математическую модель сложного технического объекта. Наличие пос-ледней позволит значительно упростить дальнейшую процедуру испытаний.

Список литературы

1. Бабкин В.И., Цховребов М., Солонин В.И., Ланиши А.И. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий // Двигатель. – 2013. – №2. – С.2-7.
2. Адамов Р. И. и др. Автоматизированные испытания в авиационном строении. – М.: Машиностроение, 1989 – 232 с.
3. Полулях А.И., Лисовин И.Г., Кавалеров Б.В., Шуганов А.А. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011 – Т.7 – №11.1 – С.129 – 132.
4. Иноземцев А.А., Казанцев В.П., Грибков И.Н. Разработка систем автоматического управления сложными техническими объектами авиадвигателестроения с использованием технологии модельно-ориентированного проектирования // Сб. тезисов междунар. научно-технич. конф. по авиационным двигателям International Conference on Aviation Motors – ICAM 2020 – 2021 – Т. 1 – С. 20-23.
5. Jensen J. C., Chang D. H., Lee E. A. A model-based design methodology for cyber-physical systems // 2011 7th international wireless communications and mobile computing conference. – IEEE, 2011. – С. 1666-1671.
6. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления // М.: Изд-во МАИ – 1999. – 82 с.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. Издательский дом Вильямс, 2008.
8. Asgari H., Chen X.Q., Menhaj M. B., Sainudiin R. Artificial neural network-based system identification for a single-shaft gas turbine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: American Society of Mechanical Engineers – 2013 – Т. 135 – №. 9 – С. 092601 – 7.
9. Килин Г. А., Кавалеров Б. В. Нейросетевая математическая модель для автоматизации испытаний системы автоматического управления газотурбинных электростанций малой и средней мощности // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №. 2. – С. 78-82.
10. Заборовцев Е. А., Колпакова М. А., Килин Г. А. Нейросетевая математическая модель газотурбинной электростанции с учетом различных режимов ее эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – №. 34.

Килин Григорий Александрович – старший преподаватель, **Суслов Артем Игоревич** – ассистент, **Кавалеров Борис Владимирович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой ЭТиЭМ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», **Грибков Игорь Николаевич** – заместитель начальника отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель», **Плешивых Артур Сергеевич** – инженер-конструктор отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель».

E-mail: thisisforasm@rambler.ru, suslov_ai@mail.ru, kbv@pstu.ru, gribkov@avid.ru

Accenture и SAP разработают совместное решение на базе искусственного интеллекта и облачных технологий

Accenture и SAP объявили о запуске совместной инициативы по разработке и выводу на рынок нового облачного продукта, расширяющего функциональность текущего решения SAP Intelligent Asset Management.

Индустриальная экспертиза и наработки Accenture помогут компаниям энергетической, нефтегазовой, горнодобывающей и металлургической промышленности существенно увеличить возможности и эффективность в области управления активами за счет изменения стратегии в области ТОиР с аварийного обслуживания на плановое обслуживание. В конечном счете это позволит компаниям увеличить уровень операционной безопасности, минимизировать влияние на окружающую среду и снизить затраты на техническое обслуживание систем.

Новые возможности планируется реализовать на базе решений SAP Intelligent Asset Management и SAP S/4HANA, взяв за основу платформу SAP Business Technology Platform. Благодаря гибкости и масштабируемости в облаке эти решения будут собирать и объединять операционные данные в реальном времени из нескольких источников, включая IoT и данные с датчиков оборудования. С помощью инструментов расширенной аналитики и искусственного интеллекта компании смогут анализировать эти данные и строить прогнозы.

Это позволит компаниям получить полное представление о состоянии производственных активов и сформировать набор ре-

комендаций о следующих действиях в рамках превентивного обслуживания. Кроме того, оптимизировать объем работ и усилия, необходимые для осмотра, планового ремонта и аварийного обслуживания оборудования.

Повышая уровень технического обслуживания, оптимально планируя такие работы, компании смогут повысить уровень бережливого производства товаров и услуг.

Кроме того, Accenture и SAP планируют создать рабочую группу по внедрению инноваций совместно с клиентами из различных отраслей на основе их обратной связи, новых идей с целью создания отраслевых стандартов интеллектуального управления активами.

Accenture совместно с SAP разрабатывает отраслевые решения для SAP S/4HANA более пяти лет, работая над более чем 80 новыми SAP продуктами в различных отраслях. У Accenture более 70 тыс. специалистов SAP по всему миру, а альянс с SAP насчитывает более 40 лет.

Для ускорения внедрения отраслевых решений, клиенты также могут воспользоваться платформой MyConcerto от Accenture. MyConcerto содержит наработки, полученные в разных проектах, начиная с бизнес-процессов, проектных решений, операционных показателей эффективности и бенчмарков, а также настроенное решение SAP, где автоматизированы основные сквозные сценарии ТОиР.

[Http://www.accenture.com](http://www.accenture.com)