

УДК 681.51:004.032.26

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Килин Г.А., Кавалеров Б.В.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь,  
e-mail: [thisisforasm@rambler.ru](mailto:thisisforasm@rambler.ru), [kbv@pstu.ru](mailto:kbv@pstu.ru)

В настоящее время интересы развития устойчивой электроэнергетики диктуют необходимость внедрения современных методов автоматического управления для генерирующих модулей, которые часто строятся на базе конвертированных авиационных двигателей. Узким местом здесь продолжает оставаться использование традиционных подходов и традиционных устройств системы управления, которые также, как правило, строятся на незначительной доработке, а точнее, перенастройке авиационных прототипов. В результате неэффективной работы газотурбинной установки (ГТУ) страдает качество вырабатываемой электроэнергии по частоте и напряжению. Для получения системы автоматического управления (САУ), удовлетворяющей условиям выработки электроэнергии, необходимо проводить большое количество испытаний объекта управления. При наличии математической модели газотурбинной электростанции (ГТЭС) процедура настройки параметров САУ ГТЭС значительно упрощается, так как исключается затратная по времени и ресурсам эксплуатация реального объекта. При этом не все существующие модели ГТЭС подходят для процедуры настройки параметров регулятора САУ. В статье описывается нейросетевая математическая модель ГТЭС, которая специально создавалась как объект управления для ее последующего использования при настройке САУ. Использование нейросетевой математической модели ГТЭС на этапе научно-исследовательских испытаний приводит к значительным сокращениям времени отладки САУ ГТЭС на всех последующих этапах испытаний.

**Ключевые слова:** автоматизация испытаний, газотурбинная установка, газотурбинная электростанция, математическая модель, искусственные нейронные сети, автоматическая настройка

## NEURAL NETWORK MATHEMATICAL MODEL FOR AUTOMATION TESTS OF ACS GTU ELECTRIC POWER PLANTS OF SMALL AND MEDIUM POWER

Kilin G.A., Kavalеров B.V.

Federal State Educational Institution of Higher Education Perm National Research Polytechnic  
University, Perm, e-mail: [thisisforasm@rambler.ru](mailto:thisisforasm@rambler.ru), [kbv@pstu.ru](mailto:kbv@pstu.ru)

In our days, the interests of developing sustainable electric power industry dictate the need to introduce automatic control modern methods for generating modules, which are often built on the basis of converted aircraft engines. The bottleneck here continues to be the use of traditional approaches and traditional control system devices, which also, as a rule, are based on minor revision, or rather retuning, of aircraft prototypes. As a result of the inefficient operation of the gas turbine unit (GTU), the generated electricity quality in frequency and voltage suffers terms. To obtain an automatic control system (ACS) that satisfies the conditions for generating electricity, it is necessary to conduct a large number of control object tests. In the presence of a gas-turbine power plant (GTPP) mathematical model, the procedure for setting the parameters of the GTPP ACS is greatly simplified, since the real object is excluded in time and resources terms. However, not all existing GTPP models are suitable for the procedure for setting parameters of the ACS controller. The article describes the GTPP neural network mathematical model, which was specially created as a control object for its subsequent use in setting up an ACS. The use of the GTPP neural network mathematical model at the stage of research trials leads to significant reductions in the debugging time of the ACG GTES at all subsequent testing stages.

**Keywords:** test automation, gas turbine unit, gas-turbine power plant, mathematical model, artificial neural networks, automatic tuning

Хорошо известно, что электроэнергетика играет определяющую роль в промышленном производстве и, как следствие, в обеспечении всей текущей жизни нашей страны. Опыт развития электроэнергетических систем (ЭЭС) в мире и в России показывает высокую востребованность применения в энергетике газотурбинных установок (ГТУ) малой и средней мощности [1–3]. В России большое число таких ГТУ создается на базе конвертированных авиационных двигателей отечественной

разработки [4], причиной является высокий уровень развития предприятий авиационного двигателестроения в нашей стране и очень большой опыт разработки ГТУ наземных версий применения, особенно активизировавшийся с начала 1990-х гг. Сегодня отечественные ГТУ малой и средней мощности широко используются для электроснабжения и теплоснабжения в городах и поселках, в отдаленных, труднодоступных районах, в воинских и пограничных частях.

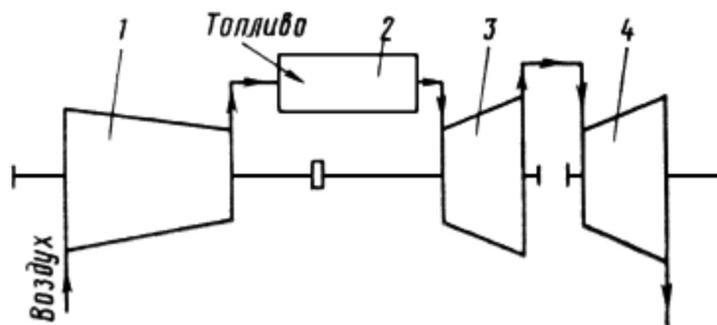


Рис. 1. Кинематическая схема двухвальной ГТУ (1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – компрессорная турбина; 4 – свободная турбина)

Для нормальной работы конвертированных авиационных ГТУ в составе газотурбинной электростанции (ГТЭС) необходима система автоматического управления (САУ) ГТУ. Одной из основных функций САУ ГТУ является обеспечение требуемых ГОСТами и отраслевыми стандартами показателей качества вырабатываемой электроэнергии. В настоящее время в отрасли существует практика использования для САУ энергетических ГТУ незначительно переработанных САУ для авиационных ГТУ. Такая ситуация вполне оправдана. Ведь при этом в полной мере используются богатые наработки отраслевых проектных организаций. Однако такие САУ ГТУ изначально проектировались для авиации. Это означает, что «привязка» САУ к новым условиям работы требует увеличения удельной доли испытаний таких САУ в условиях, максимально приближенных к эксплуатации САУ ГТУ в составе ГТЭС, при этом именно с учетом проводимых испытаний должна выполняться настройка и подстройка САУ ГТУ. При этом существенно увеличивается длительность и стоимость таких испытаний. Ситуацию усугубляет то, что в настоящее время при разработке, испытаниях и настройке САУ ГТУ влияние ЭЭС учитывается лишь в незначительной мере. Все это приводит к серьезным препятствиям в обеспечении необходимых показателей качества электроэнергии, вырабатываемой газотурбинными электростанциями (ГТЭС) [5].

Учет влияния ЭЭС при испытаниях ГТУ необходим еще и потому, что в силу своей конструкции ГТУ представляют собой довольно сложные для управления объекты (рис. 1). По этой причине для выработки эффективных алгоритмов управления, для настройки автоматических регуляторов САУ ГТУ должны проходить испытания во взаимодействии с другими подсистемами, прежде всего с электрогенератором и ЭЭС

в целом. Отсутствие таких испытаний не только затягивает процедуры настройки САУ в ходе испытаний, но и снижает качество вырабатываемой ГТЭС электроэнергии по частоте и напряжению, что особенно проявляется при автономной работе ГТЭС. В статье предлагается для испытаний и настройки САУ ГТУ использовать нейросетевую модель ЭЭС, позволяющую гибко и эффективно имитировать широкий класс возмущений электрической системы, действующих на САУ ГТУ.

#### Материалы и методы исследования

Испытания САУ ГТУ состоят из последовательности этапов. Каждый из этапов испытаний ГТУ в той или иной мере сопровождается настройкой регуляторов САУ ГТУ (рис. 2) [6, 7].



Рис. 2. Этапы испытаний САУ ГТУ

На этапах испытания САУ ГТУ выполняются следующие работы:

1) при научно-исследовательских испытаниях проводится разработка структуры САУ;

2) при опытно-конструкторских испытаниях проводится коррекция структуры САУ;

3) во время эксплуатационных испытаний проводятся работы по диагностике отказов и технического состояния САУ, а также модификация САУ.

Процедура настройки является очень затратной, как по времени, так и по человеческим и материальным ресурсам, особенно затратными являются операции ручной настройки САУ при доводочных и эксплуатационных испытаниях, так как в этом случае время настройки существенно возрастает при одновременном увеличении расходов на эксплуатацию ГТЭС.

Кроме того, на каждом из этапов испытаний в отдельности приходится организовывать циклические процедуры настройки и проверки настроенных параметров (рис. 3)

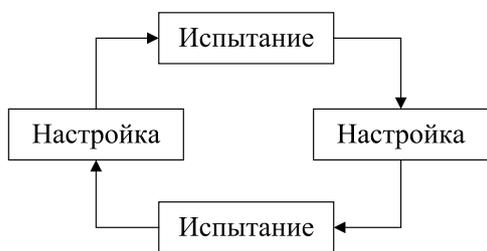


Рис. 3. Циклические процедуры настройки и проверки настроенных параметров в ходе испытаний

Приходится многократно подстраивать параметры регуляторов САУ и проверять их в ходе испытаний. Поэтому целесообразным является перенос основного массива процедур настройки на более ранние этапы испытаний, с натурных и полунатурных испытаний на компьютерные испытания. Но для этого нужна адекватная информация о поведении САУ в реальных условиях эксплуатации. На начальных этапах испытаний эту информацию можно получать от адекватной математической модели газотурбинной электростанции [8], работающей на выделенную электрическую нагрузку.

К сожалению, большинство известных математических моделей ГТУ и ЭЭС мало пригодны для автоматизации настройки параметров регуляторов САУ ГТУ, так как они либо разрабатываются с другой целью, либо их быстродействие недостаточное [4, 9, 10]. Именно поэтому предлагается разработать принципиально новую – нейросетевую модель, объединяющую в своем составе ГТУ и ЭЭС. Такая модель создается для автоматизации настройки параметров регуляторов САУ ГТУ, на ее основе

может быть предложена новая методика настройки САУ ГТУ на различных этапах испытаний. Разрабатываемая модель должна включать в себя не только ГТУ, но и ЭЭС, поскольку именно режимная ситуация в ЭЭС определяет текущие особенности функционирования САУ ГТУ. Кроме того, модель должна быть существенно упрощенной, это необходимо для достижения приемлемой скорости моделирования и многократной автоматической настройки (как это показано на рис. 2). Но в то же время такая модель должна обладать достаточной точностью для получения на ее основе адекватных параметров настройки регуляторов САУ.

Поэтому налицо определенная проблема. Процесс настройки САУ ГТУ является весьма трудной и затратной процедурой (по различным экспертным оценкам вплоть до 50% стоимости ГТУ). Существующие же модели мало пригодны для автоматической настройки параметров регуляторов САУ ГТУ. Чтобы преодолеть проблему, необходимо разработать объединенную нейросетевую модель ГТУ совместно с ЭЭС, разработать новые алгоритмы моделирования, идентификации и настройки САУ ГТУ. Результатом исследований должна стать новая методика автоматизированных испытаний и настройки САУ ГТУ на основе нейросетевой модели ГТУ и ЭЭС.

### Результаты исследования и их обсуждение

Таким образом, в результате анализа недостатков существующих моделей ГТУ и ЭЭС [11] предложен альтернативный вариант построения математической модели ГТЭС на основе нейронной сети (рис. 4).

Где  $n_{TK}$  – частота вращения турбокомпрессора ГТУ;  $n_{CT}$  – частота вращения свободной турбины ГТУ;  $U$  – напряжение синхронного генератора (СГ);  $I$  – ток СГ;  $N_G$  – мощность СГ;  $G_T$  – расход топлива;  $U_F^G$  – напряжение обмотки возбуждения;  $P$  – активная мощность нагрузки сети (также в модель может быть легко введена реактивная мощность);  $w_{bc}^a$  – весовой коэффициент связи ( $a$  – индекс таблицы весов,  $b$  – номер нейрона в слое, откуда идет связь,  $c$  – номер нейрона в слое, куда приходит связь). Количество нейронов в обоих скрытых слоях равно 30 ( $n = m = 30$ ).

На основе нейронной сети (рис. 4) получена математическая модель ГТЭС. Данная модель показала требуемую адекватность, как в разомкнутом, так и в замкнутом контуре с работающим регулятором САУ ГТУ (рис. 5). В таблице показаны достигнутые меры адекватности модели.

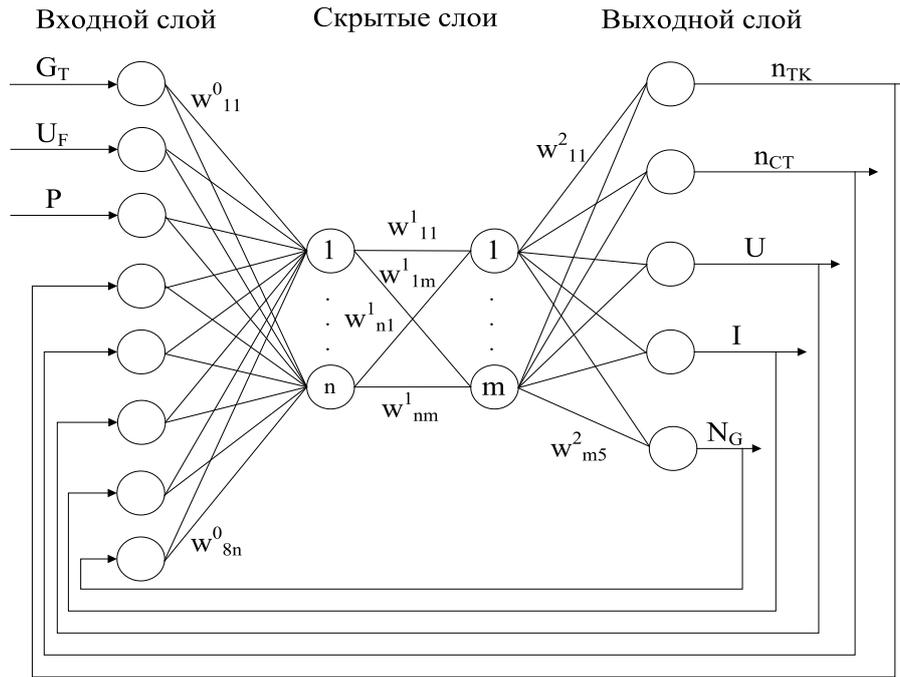


Рис. 4. Архитектура нейронной сети газотурбинной электростанции

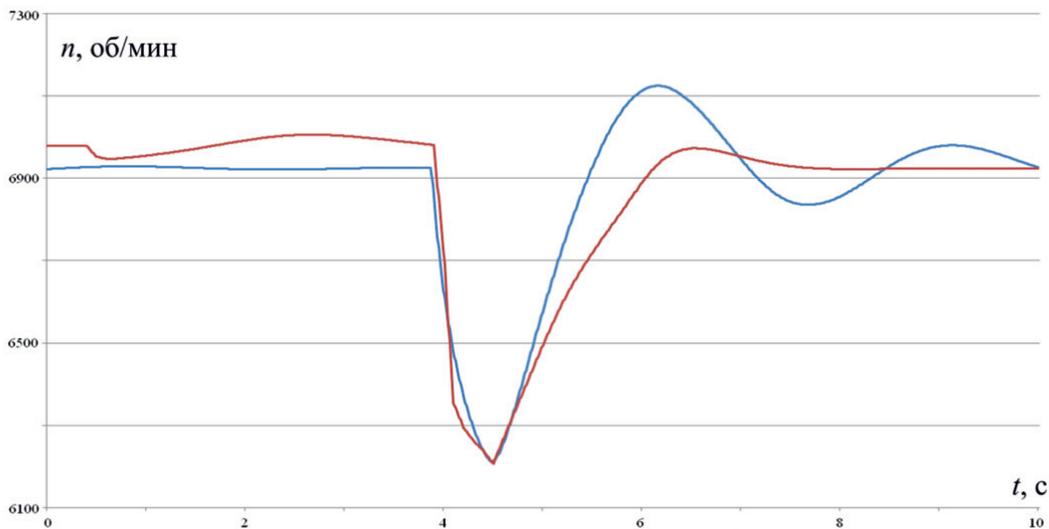


Рис. 5. Изменение частоты вращения свободной турбины  $n_{СТ}$  (синяя – экспериментальная, красная – модельная) в замкнутом контуре

Меры адекватности

Частота вращения свободной турбины	Мера адекватности модели
Критерий Тейла	0,01302
Критерий Пирсона ( $\chi^2$ )	18,388 ( $\chi^2(0,05, 30) = 43,8$ )

Компьютерные эксперименты показали, что использование нейросетевой математи-

ческой модели газотурбинной электростанции для настройки параметров регулятора ГТУ позволяет сократить время испытаний не менее чем в 3 раза.

**Заключение**

Использование нейросетевой математической модели является перспективным при проведении испытаний САУ ГТУ. Во-

первых, такая модель позволяет настраивать в ходе испытаний параметры регуляторов САУ ГТУ в автоматическом режиме из-за высокого достигаемого быстродействия. Во-вторых, данная модель позволяет настраивать параметры регуляторов СГ с учетом динамики электрической части ГТЭС. Использование различных алгоритмов настройки позволит в значительной мере упростить, а также ускорить процесс настройки параметров регуляторов в ходе испытаний САУ ГТУ, что приводит к существенной экономии человеческих и материальных ресурсов при испытаниях САУ ГТУ.

### Список литературы

1. Галашов Н.Н. Эффективность применения газовых турбин на ТЭС для привода собственных нужд // Известия Томского политехнического университета. 2008. № 4. С. 48–50.
2. Фахразиев И.З., Зацаринная Ю.Н. Экономические и технологические преимущества использования газотурбинных установок на ТЭС // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 3. С. 291–292.
3. Фам Х.А., Рассохин В.А., Андреев К.Д. Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1 (166). С. 32–35.
4. Воскобойников Д.В. Имитационное моделирование физических процессов основных систем ГТУ с конвертированными авиационными ГТД // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–18. С. 3926–3930.
5. Полулях А.И., Лисовин И.Г., Кавалеров Б.В., Шигапов А.А. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 11. С. 129–132.
6. Зеленков Ю.А., Чувилин В.Ю., Журавлев В.Е. Комплексная автоматизация испытаний газотурбинных двигателей. Часть 2: Хранение и обработка данных // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15. № 2 (42). С. 126–131.
7. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. М.: Изд-во МАИ, 1999. 82 с.
8. Килин Г.А., Один К.А., Кавалеров Б.В. Программный комплекс для получения математических моделей газотурбинных электростанций // Системы управления и информационные технологии: «Научная книга». 2015. Т. 59. № 1–1. С. 145–148.
9. Кишалов А.Е., Ахмедзянов Д.А. Повышение эффективности процесса отладки форсажных режимов при испытаниях ТРДДФ // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 2 (47). С. 87–97.
10. Кожин Д.Г., Кривошеев И.А., Горюнов И.М.. Имитационное моделирование авиационных двигателей // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/issue/view?id=106> (дата обращения: 24.11.2018).
11. Килин Г.А., Кавалеров Б.В., Один К.А. Построение быстрорешаемой модели ГТУ для автоматизированной настройки систем управления // Научные исследования и инновации. 2012. Т. 6. № 1. С. 157–164.