

УДК 621.311.238:681.511.2-047.58

И.Р. Зиятдинов, Б.В. КавалеровПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНОЙ
УСТАНОВКОЙ КАК МНОГОСВЯЗНЫМ
ОБЪЕКТОМ УПРАВЛЕНИЯ**

Исследуются возможности построения многосвязных систем автоматического управления газотурбинными электростанциями. Изучаются современные тенденции развития адаптивного управления и перспективы его применения в электроэнергетике. Известно, что предприятия отечественного авиационного двигателестроения выпускают газотурбинные установки (ГТУ) не только для авиации, но также для построения электростанций различной мощности. Известно, что ГТУ является работоспособной лишь при наличии системы автоматического управления (САУ), поэтому задачам совершенствования САУ ГТУ уделяется серьезное внимание. В ГТУ, предназначенных для электростанций, возникает необходимость обеспечения заданных показателей качества электроэнергии в условиях постоянно изменяющихся электрической нагрузки и режимов работы электростанции, что увеличивает требования к САУ. Рассматриваются способы для существенного улучшения параметров многосвязных систем автоматического управления за счет использования регуляторов, построенных с применением алгоритмов нечеткой логики, введение адаптивного САУ с эталонной моделью и САУ с настраиваемой моделью, нейронных сетей. Исследуются возможности их построения, анализируются их преимущества и недостатки. В качестве метода адаптации целесообразно выбрать метод, основанный на функции Ляпунова, из соображений сокращения времени поиска экстремума. В качестве модели ГТУ используется сложная динамическая модель ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь), предназначенная для тестирования алгоритмов управления и использования в составе полунатурных испытательных стендов. В качестве модели САУ используется программный код штатной САУ электроэнергетической ГТУ. Выполнен анализ современных тенденций развития адаптивного управления и перспектив его применения в электроэнергетике. Модели выполняются совместно в составе программного моделирующего комплекса КМЭС и MatLab.

Ключевые слова: газотурбинная установка, многосвязная система автоматического управления, моделирование, адаптивная система автоматического управления, сравнительный анализ.

I.R. Ziyatdinov, B.V. Kavalero

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF MULTIPLY CONNECTED AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR A GAS TURBINE PLANT

The article explores the possibilities of constructing multiply connected systems for automatic control of gas turbine power stations. It is known that the enterprises of the domestic aircraft engine manufacture produce gas turbine units (GTU) not only for aviation, but also for the construction various capacities power stations. It is known that GTU is efficient only if there is an automatic control system (ACS), so the tasks of improving the SAU GTU are given serious attention. In GTU, intended for power plants, there is a need to provide specified indicators of electric power quality in conditions the power plant constantly changing electric load and changing operating modes, which increases the requirements for automatic control systems. We consider ways to significantly improve the parameters of multiply connected systems of automatic control by using regulators built using fuzzy logic algorithms, the introduction of an adaptive ACS with a reference model and automatic control system with a tunable model, neural networks. The possibilities of their construction are explored, their advantages and disadvantages are analyzed. As a method of adaptation, it is advisable to choose a method based on the Lyapunov function, because search time the shortening for the extremum. As a model GTU uses a complex dynamic model of Aviadvigatel OJSC (Perm), designed to test control algorithms and use as part of semi-standard test benches. As the model of automatic control system, the program code electric power GTU the regular ACS the electric power GTU is used. The models are implemented jointly as part of the software modeling complex KMES and MatLab.

Keywords: gas-turbine plant, multiply connected automatic control system, simulation, adaptive automatic control system, comparative analysis.

Введение. Быстрые темпы научно-технического прогресса в течение последних десятилетий предопределяют ускоренное развитие управляемых сложных динамических систем и, в частности, систем автоматического управления (САУ) авиационными газотурбинными двигателями (ГТУ). Анализ тенденций развития авиационных ГТУ и их систем управления показывает, что объем функций, выполняемых САУ перспективными ГТУ, определяется следующими основными факторами:

- 1) дальнейшим усложнением конструкции двигателей, связанным с созданием адаптивных ГТУ, изменяющих в широком диапазоне свою структуру и параметры для обеспечения наиболее эффективного режима работы [1];
- 2) дальнейшим повышением требований к качеству процессов управления, ресурсу, экономичности, необходимостью перехода к эксплуатации по состоянию [2];

3) включением системы управления ГТУ (в качестве подсистемы) в интегральную газотурбинную электростанцию (ГТЭС) [3].

Данные факторы приводят к повышенной сложности и большому количеству решаемых задач, еще большему увеличению количества регулируемых параметров и регулирующих факторов в системе управления на переходных режимах, ужесточению требований к различным свойствам системы, качеству функционирования отдельных подсистем [4, 5] и их взаимодействию. Другими словами, для современных и перспективных авиационных ГТУ характерны: высокая интенсификация процессов управления, широкий диапазон изменения внешних условий полета и режимов работы, наличие нескольких взаимосвязанных друг с другом управляемых рабочих параметров, действие сильных возмущений на входе двигателя. Следствием этого являются отсутствие точных математических моделей либо их чрезмерная сложность, высокая размерность пространства состояний и принимаемых решений по управлению, иерархичность, многообразие критериев качества, высокий уровень шумов и т.д.

Таким образом, ГТУ как объект управления относится к классу многосвязных нестационарных и нелинейных объектов, функционирование которого происходит в условиях параметрической и структурной неопределенности. В качестве источников возникновения неопределенностей здесь выступают дефицит информационных, временных энергетических, материальных и других видов ресурсов либо непредсказуемость поведения внешней среды, либо непредвиденные изменения в структуре и поведении самой системы. Эффективное управление таким сложным динамическим объектом (СДО) требует полной автоматизации процедур выбора оптимальных значений регулируемых координат (программ управления) в зависимости от текущей цели управления, состояния элементов конструкции силовой установки. Соответствующее изменение характера организации процесса управления возможно лишь при построении САУ [6] авиационными ГТУ в классе многоуровневых адаптивных систем. Поэтому повышение эффективности процесса управления и дальнейшего развития САУ ГТУ, способных компенсировать последствия влияния неопределенных факторов, является весьма актуальной проблемой.

Рассмотрим в связи с этим перспективные методы управления ГТУ как многосвязным объектом управления. В качестве модели САУ используется программный код штатной САУ [7,8] электроэнергетической ГТУ.

Применение адаптивной САУ с эталонной моделью (ЭМ).

Среди адаптивных САУ сложными динамическими объектами широкое распространение получили системы, построенные в классе бесперебойных самонастраивающихся систем (БНС) с эталонной моделью, настраиваемый регулятор параметрического управления которых реализован на основе концепции настраиваемой модели (НМ). Структура контура нижнего уровня управления в данных БНС, синтезируемая из условия инвариантности движения регулируемых координат от параметрических возмущений, обладает принципиальной возможностью строгой компенсации влияния нестационарности объекта управления на динамику замкнутой системы.

Принципы построения и методы синтеза БНС с эталонной моделью и НМ наиболее близки к решению задачи синтеза адаптивных алгоритмов управления ГТУ, поскольку в БНС данного типа существует принципиальная возможность отдельного рассмотрения регуляторов координатного управления (РКУ) в основном контуре системы и регулятора параметрического [9] или сигнального управления [10] (РПУ и РСУ) в контуре адаптации (рис. 1, 2). Это в значительной степени облегчает как расчет и проектирование, так и доводку системы, а также обеспечивает большую гибкость при разработке и доводке системы, позволяя, например, изменять принципы построения, структуру или параметры РКУ, не затрагивая при этом той части системы, которая придает ей свойство адаптации. Однако широко распространенные на практике интегральные законы изменения настраиваемых коэффициентов НМ, обеспечивая при выполнении определенных условий асимптотическую устойчивость системы в целом, равномерную по начальному моменту времени и начальным рассогласованиям в системе относительно движения эталонной моделью, зачастую приводят к медленно затухающим и сильно колебательным процессам отработки параметрических возмущений РПУ. В связи с этим весьма актуальным является расширение класса возможных алгоритмов адаптации, что позволило бы повысить динамическую точность отработки широкого класса параметрических возмущений и тем самым расширить границы применимости на практике адаптивных МСАУ ГТУ с замкнутыми алгоритмами адаптации.

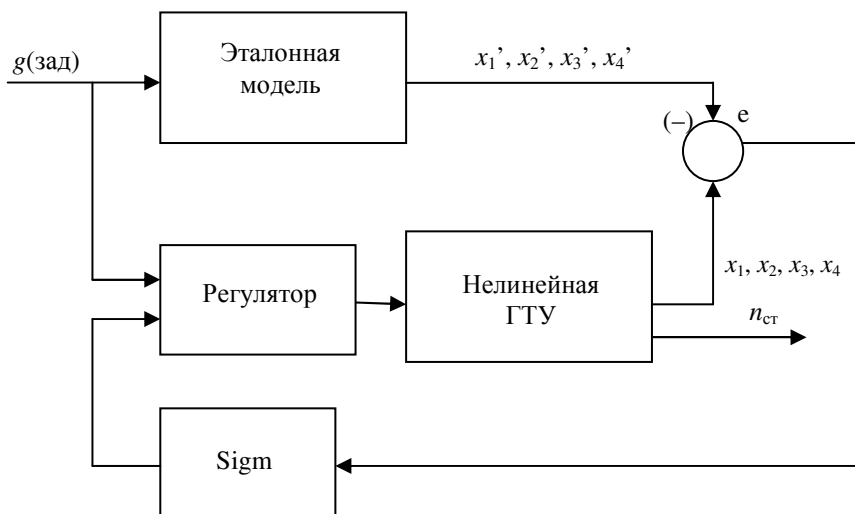


Рис. 1. Модуль сигнального адаптивного управления: x_1 – частота вращения свободной турбины, x_2 – частота вращения турбокомпрессора, x_3 – выход интегратора регулятора дозатора газа, x_4 – выход интегратора регулятора свободной турбины, $g(\text{зад})$ – входная уставка, $n_{\text{ст}}$ – выходная величина

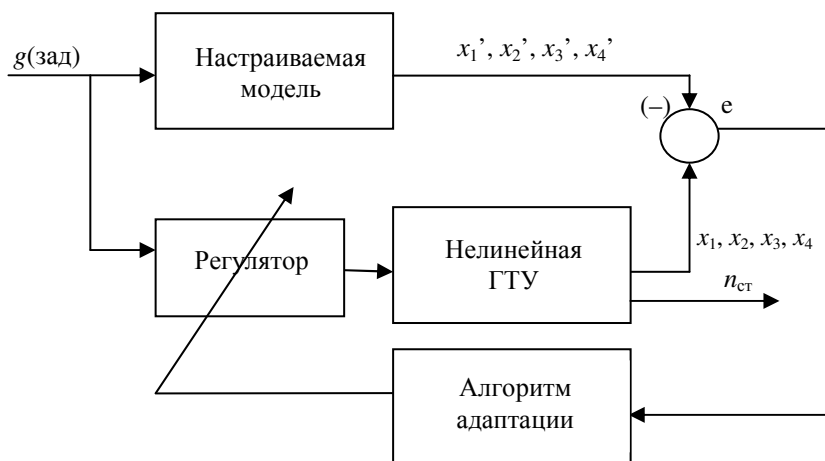


Рис. 2. Модуль параметрического адаптивного управления: x_1 – частота вращения свободной турбины, x_2 – частота вращения турбокомпрессора, x_3 – выход интегратора регулятора дозатора газа, x_4 – выход интегратора регулятора свободной турбины, $g(\text{зад})$ – входная уставка, $n_{\text{ст}}$ – выходная величина

При проектировании основного контура адаптивных САУ ГТУ в классе многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) возникают серьезные проблемы, связанные с тем, что эти системы относятся к классу многофункциональных систем, поскольку при изменении

компоновки МСАУ или изменении динамических свойств сепаратных подсистем меняется и описывающая ее система дифференциальных уравнений. Основная трудность при этом заключается в обеспечении на всех режимах устойчивости и желаемого качества функционирования как МСАУ в целом, так и её сепаратных подсистем. Потому с целью придания адаптивной МСАУ ГТУ свойств самоорганизации требуется разработка обоснованных рекомендаций по выбору структуры много-связного РКУ.

Применение алгоритмов нечеткой логики. В настоящее время для существенного улучшения параметров систем автоматического управления всё шире используются регуляторы, построенные с применением алгоритмов нечёткой логики [11]. Под нечетким управлением понимается стратегия управления, основанная на эмпирически приобретенных знаниях относительно функционирования объекта (процесса), представленных в лингвистической форме в виде некоторой совокупности правил [12]. Реализация алгоритмов нечеткого управления при этом принципиально отличается от классических («жестких») алгоритмов, построенных на основе концепции обратной связи и, по существу, просто воспроизводящих некоторую заданную функциональную зависимость или дифференциальное уравнение. Нечеткий регулятор (рис. 3) берет на себя те функции, которые обычно выполняются опытным и умелым обслуживающим персоналом. Эти функции связаны с качественной оценкой поведения системы, анализом текущей меняющейся ситуации и выбором наиболее подходящего для данной ситуации способа управления объектом. Данная концепция управления получила название опережающего (или упреждающего) управления.

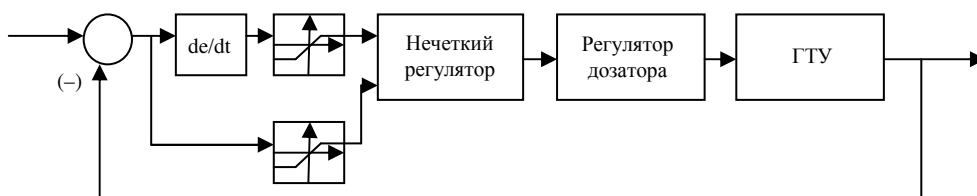


Рис. 3. Модуль управления с нечеткой логикой

На основе приведенного анализа принципа построения нечетких систем управления показано [13, 14], что применение нечеткой логики обеспечивает новый подход к проектированию систем управления и в отличие от традиционных способов управления гарантирует

возможность решения широкого круга проблем в условиях неопределенности, в которых данные, цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определенными и в силу этого не поддаются точному математическому описанию. Отмечается, что дальнейшее применение нечетких систем регулирования в силу того, что они по своим свойствам относятся к нелинейным системам, сдерживается отсутствием четких критериев оценки качества и, как следствие, формализованных методов анализа и синтеза данного класса систем. Поэтому дальнейшая разработка методов анализа и синтеза нечетких систем управления является актуальной задачей.

Нечеткий регулятор как единый нелинейный элемент при использовании численных методов интегрирования может быть гармонически линеаризован. Это позволяет проводить исследования периодических движений в нечетких системах управления.

Применение нейронной сети. В настоящее время нейронные сети находят огромное применение во многих задачах, авторы статей [15, 16] продемонстрировали, что они отлично проявляют себя в распознавании изображений, нашли широкое применение в финансовой сфере. Всё больший интерес к искусственным нейронным сетям проявляют различные отрасли промышленности, благодаря их способности аппроксимировать любой вид нелинейности они нашли применение в задачах идентификации газотурбинной установки (ГТУ) [17]. Именно поэтому было решено использовать нейронные сети в создании модели газотурбинной электростанции (ГТЭС). Но для того чтобы нейросетевая модель адекватно работала, её необходимо обучить.

Обучение нейронной сети – это очень трудоемкая и объемная задача, она включает в себя получение и подготовку экспериментальных данных, выбор количества нейронов, выбор функции активации, архитектуры и метода обучения нейронной сети. В ходе обучения нейронной сети [18] получаем нейросетевую модель объекта (рис. 4). Именно эта нейросетевая модель будет использована для настройки параметров регулятора.

Выбор данных и обработка исходных данных являются довольно сложными этапами. В связи с отсутствием доступа к реальной установке данные получались с помощью сложной поэлементной математической модели ГТУ и электроэнергетической системы (ЭЭС), разработанной на авиадвигателестроительном предприятии в виде

программно-моделирующего комплекса КМЭС (ПМК КМЭС) [19], данная программа имеет обширную область изменяемых параметров ГТЭС, настройка которых производилась с учетом поставленной задачи.

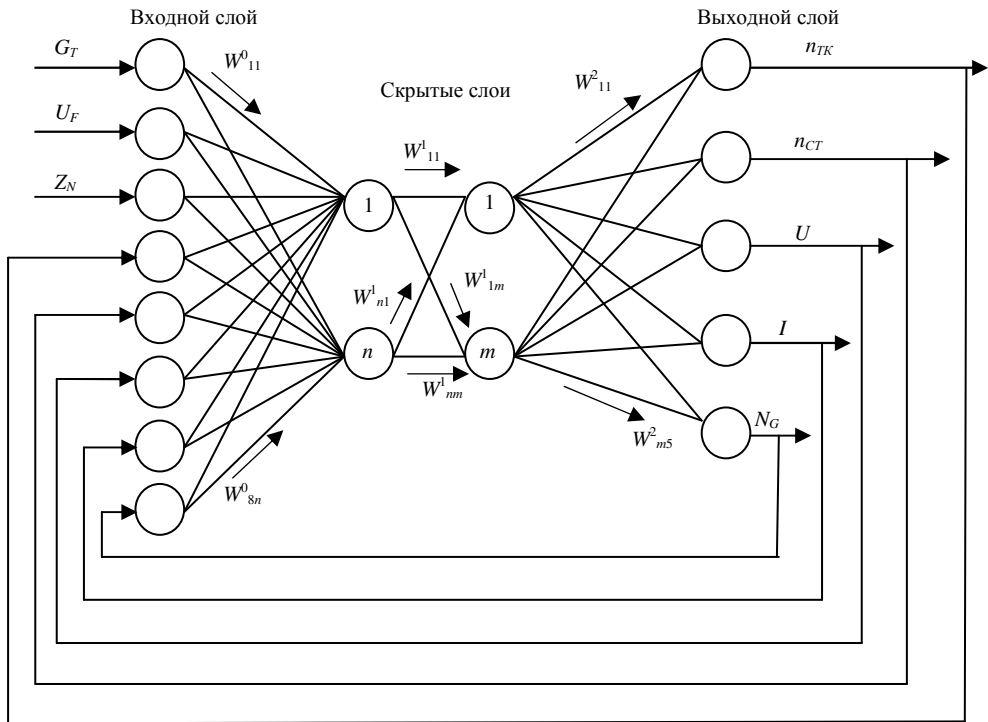


Рис. 4. Архитектура нейронной сети: n_{TK} – скорость вращения турбокомпрессора; n_{CT} – скорость вращения свободной турбины; U – напряжение синхронного генератора (СГ); I – ток СГ; N_G – мощность СГ; G_T – расход топлива, U_F – напряжение обмотки возбуждения; Z_N – статическая нагрузка СГ; w^a_{bc} – 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 ($n=m=30$)

Выводы. Быстрое развитие системных понятий, современных принципов теории управления и информационных технологий на базе последних достижений вычислительной техники существенно расширило границы применимости и возможности реализации на практике быстро функционирующих управляемых сложных систем (УСС), в частности, адаптивных систем реального времени с замкнутыми алгоритмами адаптации. Более того, это привело к появлению принципиально новых классов систем управления, таких как интеллектуальные

системы. Однако анализ отечественных и зарубежных работ таких учёных, как Е.И. Воробьёв, Н.М. Амосов, К.В. Фролов, С.В. Елисеев, В.М. Лохин, В.Н. Захаров, Д.А. Пospelов, Ф.М. Кулаков, Э. Мамдани, Л. Заде, К. Фу, Ж. Лорьер, показывает, что, несмотря на то, что в данной области ведутся активные исследования, до сих пор не решён целый ряд проблем, в первую очередь связанных с возможностью работы данного класса САУ в существенно изменяющейся внешней среде в режиме реального времени. Другими словами, идея интеллектуального управления применительно СДО с высокой степенью ответственности пока еще не нашла широкого распространения в силу сравнительной сложности ее реализации. Также нечеткие системы регулирования и системы управления с использованием нейронных сетей относятся к нелинейным системам по своим свойствам, что существенно затрудняет их целостность. Так, до конца не решены вопросы анализа устойчивости и качества, так как в силу сложности аналитического описания практически отсутствуют методы исследования таких систем. Основным инструментом в настоящее время является моделирование [20], что подразумевает проведение большого объема экспериментальных исследований. Ускорение темпов внедрения интеллектуальных систем в реальные системы требует оценки накопленного опыта проектирования САУ ГТУ с целью дальнейшего совершенствования и анализа перспектив их развития, а также разработки концепции построения и новых методов проектирования адаптивных МСАУ ГТУ.

Библиографический список

1. Хронин Д.В. Конструкция и проектирование авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1989.
2. Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев, Р.А. Мунасыпов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1999. – 609 с.
3. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние и проблемы) / Ю.М. Гусев, В.Н. Ефанов, В.Г. Крымский, В.Ю. Рутковский // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 3–24. – № 2. – С. 3–30.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (Взамен ГОСТ 13109-87; введ. 01.01.99 г.). – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 34 с.

5. ГОСТ Р 50783-95. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 45 с.

6. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 476 с.

7. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Крылова И.А. Исследование адаптивного алгоритма управления с газотурбинными установками учетом динамики синхронного генератора // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 6–2. – С. 235–240.

8. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Построение упрощенной модели ГТУ с учетом основных физических принципов преобразования энергии // *Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VIII Всерос. (с междунар. участ.) науч.-техн. интернет-конф.* – Пермь Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 142–153.

9. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В. Исследование системы управления с эталонной моделью и параметрической настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 12–6. – С. 1107–1111.

10. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Исследование системы управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6–2. – С. 235–240.

11. Методические основы аналитического конструирования регуляторов нечеткого управления / В.М. Лохин, И.М. Макаров, С.В. Манько, М.П. Романов // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2000. – № 1. – С. 56–69.

12. Mamdani E.H. Applications of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant // *Proc. of the IEEE*. – 1974. – Vol. 121, № 12. – P. 1585–1588.

13. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Нечеткое управление газотурбинной установкой // *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*. – 2016. – № 3. – С. 66–68.

14. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Исследование варианта структуры нечеткого ПИД-регулятора частоты вращения электроэнергетической газотурбинной установки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*.

Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 6. – С. 65–70.

15. Друки А.А. Применение сверточных нейронных сетей для выделения и распознавания автомобильных номерных знаков на изображениях со сложным фоном // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2014. – Т. 324. – № 5.

16. Роберт К. Основные концепции нейронных сетей: пер. с англ. – М.: Вильямс. – 2014. – 287 с.

17. Artificial neural network-based system identification for a single-shaft gas turbine / H. Asgari [et al.] // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2013. – Т. 135. – № 9. – С. 9–26.

18. Килин Г.А., Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В. Использование нейросетевой модели для настройки автоматических регуляторов газотурбинной электростанции // Известия УГГУ. – 2016. – № 2(42). – С. 66–69.

19. Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети «КМЭС» / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2011611839. 2011. Бюл. № 24.

20. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.

References

1. Khronin D.V. Konstruktsiia i proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei [Design and design of aviation gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1989.

2. Kusimov S.T., Iliasov B.G., Vasilev V.I., Munasyrov R.A. [et al.]. Problemy proektirovaniia i razvitiia sistem avtomaticheskogo upravleniia i kontroliia gazoturbinykh dvigatelei [Problems of designing and developing automatic control systems gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1999. 609 p.

3. Gusev Iu.M., Efanov V.N., Krymskii V.G., Rutkovskii V.Iu. Analiz i sintez lineinykh intervalnykh dinamicheskikh, sistem (sostoianie i problemy) [The analysis and synthesis of linear interval dynamical systems (state and problems)]. *Izvestiia AN SSSR. Tekhnicheskaiia kibernetika*, 1991, no. 1, pp. 3-24, no. 2, pp. 3-30.

4. GOST 13109-97. Elektricheskaiia energiiia. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia [Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1998. 34 p.

5. GOST R 50783-95. Elektroagregaty i peredvizhnye elektrostantsii s dvigateliami vnutrennego sgoraniia. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia [Electroaggregates and mobile power stations with internal combustion engines. General technical requirements]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1995. 45 p.

6. Ovcharenko N.I. Avtomatika energosistem [Automation of power systems]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2007. 476 p.

7. Ziiatdinov I.R., Kavalero B.V., Krylova I.A. Issledovanie adaptivnogo algoritma upravleniia s gazoturbinnymi ustanovkami uchetom dinamiki sinkhronnogo generatora [Investigation of an adaptive control algorithm with gas turbine units taking into account the dynamics of a synchronous generator]. *Fundamentalnye issledovaniia*, 2016, no. 6-2, pp. 235-240.

8. Kavalero B.V., Bakhirev I.V. Postroenie uproshchennoi modeli GTU s uchetom osnovnykh fizicheskikh printsipov preobrazovaniia energii [Construction of a simplified GTU model taking into account the basic physical principles of energy conversion]. *Energetika. Innovatsionnye napravleniia v energetike. CALS-tekhnologii v energetike. Materialy VIII Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 142-153.

9. Ziiatdinov I.R., Kavalero B.V. Issledovanie sistemy upravleniia s etalonnnoi modeliu i parametricheskoi nastroiiko dlia elektroenergeticheskoi gazoturbinnnoi ustanovki [Investigation of the control system with a reference model and parametric adjustment for an electric power gas-turbine unit]. *Fundamentalnye issledovaniia*, 2015, no 12-6, pp. 1107-1111.

10. Ziiatdinov I.R., Kavalero B.V., Bakhirev I.V. Issledovanie sistemy upravleniia s etalonnnoi modeliu i signalnoi nastroiiko dlia elektroenergeticheskoi gazoturbinnnoi ustanovki [Investigation of the control system with a reference model and signal setting for an electric power gas turbine unit]. *Fundamentalnye issledovaniia*, 2015, no. 6-2, pp. 235-240.

11. Lokhin V.M., Makarov I.M., Manko S.V., Romanov M.P. Metodicheskie osnovy analiticheskogo konstruirovaniia regulatorov nechetkogo upravleniia [Methodical bases of analytical design of fuzzy controllers]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Teoriia i sistemy upravleniia*, 2000, no. 1, pp. 56-69.

12. Mamdani E.H. Applications of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant. *Proc. of the IEEE*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588.

13. Kavalеров B.V., Bakhirev I.V. Nechetkoe upravlenie gazoturbinoi ustanovkoi [Fuzzy control of the gas-turbine unit]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*, 2016, no. 3, pp. 66-68.

14. Bakhirev I.V., Kavalеров B.V. Issledovanie varianta struktury nechetkogo PID-reguliatora chastoty vrashcheniia elektroenergeticheskoi gazoturbinoi ustanovki [Investigation of the variant of the fuzzy PID-controller structure of the rotation frequency of the electric power gas-turbine unit]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 6, pp. 65-70.

15. Druki A.A. Primenenie svertochnykh neironnykh setei dlia vydeleniia i raspoznavaniia avtomobilnykh nomernykh znakov na izobrazheniakh so slozhnym fonom [Application of convolutional neural networks for the identification and recognition of automobile license plates on images with a complex background]. *Izvestiia tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 324, no. 5.

16. Robert K. Osnovnye kontseptsii neironnykh setei [The basic concepts of neural networks]. Moscow: Viliams, 2014. 287 p.

17. Asgari H. [et al.]. Artificial neural network-based system identification for a single-shaft gas turbine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, vol. 135, no. 9, pp. 9-26.

18. Kilin G.A., Ziiatdinov I.R., Kavalеров B.V. Ispolzovanie neirosetevoi modeli dlia nastroiки avtomaticheskikh regulatorov gazoturbinoi elektrostantsii [Use of a neural network model for tuning automatic regulators of a gas-turbine power plant]. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2016, no. 2(42), pp. 66-69.

19. Petrochenkov A.B., Kavalеров B.V., Shigapov A.A. [et al.]. Kompleks matematicheskikh modelei elektrogeneratora i elektroseti "KMES" [Complex of mathematical models of the power generator and

electric grid "KMES"]. Svidetelstvo o registratsii programmy dlia evm №2011611839. (2011).

20. Golberg F.D., Batenin A.V. Matematicheskie modeli gazoturbinnykh dvigatelei kak obektov upravleniia [Mathematical models of gas turbine engines as control objects]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 1999. 82 p.

Сведения об авторах

Зиятдинов Илья Рудольфович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

About the authors

Ziyatdinov Ilya Rudolfovich (Perm, Russian Federation) is a Postgraduate Student of the Electro technical and electromechanical department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru).

Kavalerov Boris Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, head of the Electrotechnical and electromechanical department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено 08.10.2018