

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.10

УДК 621.452:681.513.6

И.В. Бахирев, Б.В. КавалеровПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Газотурбинные электростанции используются для производства электроэнергии в составе различных энергосистем. Поведение электрической нагрузки может серьезно отличаться от системы к системе, в зависимости от ее топологии и состава электромеханических элементов. Для повышения надежности системы управления и повышения качества электроэнергии используются адаптивные алгоритмы управления. Система управления газотурбинной установкой, входящей в состав газотурбинной электростанции, имеет сложную структуру, основанную на селектировании каналов управления. Рассмотренные в статье алгоритмы адаптивного управления дополняют штатную систему управления, взаимодействуя с выбранными контурами управления. Благодаря такому подходу сокращается время разработки и наладки адаптивного регулятора. Улучшение качества управления несет за собой снижение расхода топлива, связанного с перетоками мощностей и длительными переходными процессами, таким образом, повышается экологичность газотурбинных электростанций. **Цель исследования:** модификация алгоритма адаптивного управления газотурбинной электростанцией, упрощение процесса идентификации в реальном времени настраиваемой модели за счет использования нейросетевой идентификации параметров газотурбинной установки. **Методы:** исследование предложенной модификации процесса идентификации параметров в реальном времени настраиваемой модели газотурбинной установки проводилось с помощью математического моделирования, модификация процесса идентификации проводилась с помощью математического аппарата искусственных нейронных сетей и методов оптимизации. **Результаты:** процесс идентификации в реальном времени настраиваемой модели стал значительно проще в сравнении с ранее рассмотренным способом, основанным на функции Ляпунова. **Практическая значимость:** представленная в статье модификация позволяет создавать адаптивные системы управления с настраиваемой моделью для газотурбинных установок, входящих в состав газотурбинных электростанций.

Ключевые слова: газотурбинная электростанция, газотурбинная установка, адаптивное управление, эталонная модель, настраиваемая модель.

I.V. Bakhirev, B.V. Kavalero

Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation

APPLICATION OF NEURAL NETWORK IDENTIFICATION FOR ADAPTIVE CONTROL OF GASE TURBINE POWER PLANTS

Gas turbine power plants are used to generate electricity as part of various power systems. Electric load behavior can vary greatly from system to system, depending on its topology and composition of electromechanical elements. Adaptive control algorithms are used to improve control system reliability and power quality. The control system of a gas turbine plant, which is part of a gas turbine power plant, has a complex structure based on the selection of control channels. The adaptive control algorithms considered in the article complement the standard control system by interacting with the selected control loops. Thanks to this approach, the development and adjustment time of the adaptive controller is reduced. Improving the quality of control brings a reduction in fuel consumption associated with power overflows and long transients, thus increasing the environmental friendliness of gas turbine power plants. **Research objective:** modification of adaptive control algorithm of gas turbine power plant, simplifying the process of identification in real time adjustable model through the use of neural network identification of gas turbine plant parameters. **Methods:** the study of the proposed modification of the identification process of parameters in real-time tunable model of gas turbine power plant was conducted by mathematical modeling, the modification of the identification process was carried out using the mathematical apparatus of neural networks and optimization methods. **Results:** the process of identification in real-time tunable model is much easier in comparison with the previously considered method based on the Lyapunov function. **Practical significance:** the presented modification allows to create adaptive control systems with a tunable model for gas turbine units that are part of gas turbine power plants.

Keywords: gas turbine power plant, gas turbine unit, adaptive control, reference model, tunable model.

Введение

Одним из важных современных стимулов развития процессов производства электроэнергии является повышение экологичности и энергоэффективности. Это справедливо и для газотурбинных электростанций (ГТЭС), которые используются как при параллельной работе с общей сетью, так и в изолированных энергосистемах. Экологичность и энергоэффективность газотурбинных электростанций во многом зависят от их конструкционных параметров, тем не менее их реальные показатели также зависят от поведения энергосистемы и реакции системы управления ГТЭС на внешние возмущения. Совершенствование первичного регулятора системы автоматического управления (САУ) газотурбинной установки (ГТУ) для ГТЭС позволит как повысить качество электроэнергии, так и снизить эмиссию вредных веществ в атмосферу за счет сокращения затрат энергии на затянутые переходные процессы. Но совершенствование первичного регулятора ГТУ

требует проведения длительных исследований, поскольку при этом требуется проводить многочисленные циклические проверки принимаемых решений на этапах проектирования и синтеза регулятора ГТУ. Поэтому целесообразен альтернативный путь, при котором первичный регулятор частоты вращения САУ ГТУ остается неизменным, но к существующей САУ пристраивается подсистема адаптации (рис. 1). Эта подсистема адаптации подстраивает регулятор для совершенствования его характеристик при изменении условий эксплуатации. В результате сокращается время на создание и испытания модернизированного регулятора, так как сам регулятор остается неизменным, сохраняются и контур защит САУ, но за счет подсистемы адаптации возможности существующего регулятора используются более эффективно, чем и достигается эффект повышения показателей качества процессов регулирования, а также увеличиваются экологичность и энергоэффективность ГТЭС.

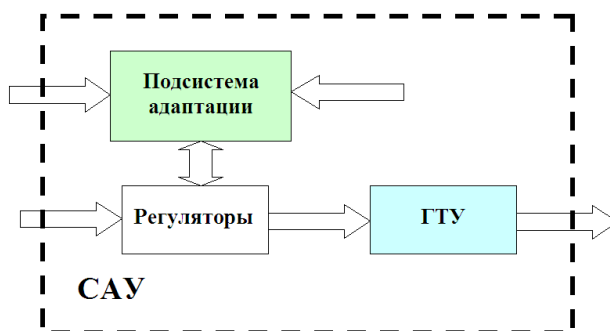


Рис. 1. Адаптивная САУ с подсистемой адаптации

Методы и алгоритмы адаптивного управления, использующие эталонную или настраиваемую модели, могут, в свою очередь, строиться с использованием параметрической и сигнальной настройки [1–3]. Проведенные исследования показали, что использование сигнальной настройки, как более быстродействующего варианта, имеет преимущество для рассматриваемого объекта управления – ГТУ [4–9]. Дальнейшие исследования показали необходимость изучать и использовать методы идентификации для получения моделей алгоритмов адаптации [10–14]. В ходе этих исследований сделан вывод о целесообразности использования искусственных нейронных сетей для получения эталонной и настраиваемой модели и, тем самым для совершенствования алгоритмов адаптации [15–19]. Далее в статье рассматривается один из способов использования

искусственных нейронных сетей для адаптивного управления САУ ГТУ для ГТЭС. Как отмечалось выше, исследование проводилось с целью поиска максимально возможного использования резервов существующих регуляторов в плане повышения экологических показателей ГТЭС за счет снижения вредных выбросов в переходных процессах путем оптимизации показателей качества этих процессов.

Адаптивное управление ГТЭС

ГТЭС состоит из следующих основных компонентов: газотурбинной установки (ГТУ), синхронного генератора и соответствующих устройств управления. В работах [7, 8, 20] было рассмотрено параметрическое и сигнальное адаптивное управление с эталонной моделью (ЭМ) и настраиваемой моделью (НМ) на основе функции Ляпунова. Сигнальное адаптивное управление, как ранее отмечено, выглядит более предпочтительным, поскольку позволяет мгновенно вырабатывать реакцию на процессы в электросистеме, вызывающие изменение нагрузки на валу. В общем виде сигнальное адаптивное управление ГТУ можно описать следующим способом [21]:

– движение ГТУ с учетом неустойчивости свойств

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, \dots); \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ – n -мерная функция состояния системы; $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ – m -мерная функция управляющих воздействий; $\boldsymbol{\xi}$ – вектор ограниченной размерности меняющихся параметров; $\mathbf{f} = \mathbf{f}(t)$ – n -мерная функция внешних возмущений; \mathbf{x}_0 – начальное состояние;

– уравнение адаптивного регулятора:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{g}), \quad (2)$$

где $\mathbf{g} = \mathbf{g}(t)$ – m -мерный вектор сигналов задания, для ГТУ – это заданная частота вращения свободной турбины $n_{\text{СТзад}}$; $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$ – m -вектор дополнительных (сигнальных) воздействий. Здесь \mathbf{z} – средство адаптации, сигнальная настройка (СН) [4].

Нелинейная нестационарная модель ГТУ может быть представлена в виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \mathbf{f}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}, t))$; $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{B}(\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}, t))$ – функциональные матрицы соответствующих размеров. Здесь предполагается управляемость

пары (\mathbf{A}, \mathbf{B}) . Описание (1) должно сопровождаться указанием границ изменения элементов матриц \mathbf{A}, \mathbf{B} ;

– эталонная модель:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}, \quad (4)$$

где $\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M$ – матрицы постоянных коэффициентов, \mathbf{x}_M – вектор состояния эталонной модели.

В данном случае поведение системы адаптации во многом будет определяться характером выбранной ЭМ или НМ, рассмотрим их достоинства и недостатки.

Линейная эталонная модель

Линейная ЭМ будет иметь расхождения с ГТУ на установившихся режимах работы, поскольку характеристики, выражающие соответствие между расходом топлива и оборотами турбокомпрессора, оборотами турбокомпрессора и вырабатываемой мощностью, являются нелинейными. В таком случае описание ЭМ и сигнальной ветви будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}, \quad (5)$$

$$\mathbf{z}(t) = -h \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); \quad h > 0, \quad (6)$$

где $\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M$ – матрицы постоянных коэффициентов, \mathbf{x}_M – вектор состояния эталонной модели, sgn – функция знака (реле), \mathbf{B} – матрица управления объекта, \mathbf{P} – матрица Ляпунова, \mathbf{e} – вектор рассогласования переменных состояния между объектом и ЭМ.

Представленная сигнальная ветвь (6) вызывает скользящий режим за счет высокочастотных колебаний. При этом амплитуда колебаний h определяется по области изменения нелинейных параметров объекта.

Нелинейная эталонная модель

Нелинейная ЭМ включает в себя нелинейные статические характеристики, выражающие зависимости переменных состояния друг от друга. В результате описание ЭМ и сигнальной ветви будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M(\mathbf{x}_M) \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}, \quad (5)$$

$$\mathbf{z}(t) = -h \operatorname{sigma}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); \quad h > 0, \quad (6)$$

где $\mathbf{A}_M(\mathbf{x}_M)$ – матрица коэффициентов, зависящих от состояния модели, \mathbf{x}_M – вектор состояния эталонной модели,

$\text{sigma}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x/k}} - 0,5 = 0,5 \frac{1 - e^{-x/k}}{1 + e^{-x/k}}$ – это сигмоидальная функция,

коэффициент $k = \text{const} > 0$ определяет угол наклона касательной к сигма-функции в нуле, \mathbf{B} – матрица управления объекта, \mathbf{P} – матрица Ляпунова, \mathbf{e} – вектор рассогласования переменных состояния между объектом и ЭМ.

В данном случае в соответствии взвешенному вектору рассогласования переменных состояния ЭМ и объекта приводится значение сигнального воздействия. Основной сложностью для практического применения данного варианта управления являются зависимость нелинейных характеристик объекта от атмосферных условий – температуры и давления и изменение характеристик объекта с течением времени в результате эксплуатации.

Настраиваемая модель

Настраиваемая модель является линейной в каждый момент времени, при этом расчет ее параметров происходит в реальном времени на основании рассогласования с объектом управления. Устойчивость процесса идентификации обеспечивается функцией Ляпунова. НМ имеет следующее описание:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}, \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{A}}^M = \Delta \mathbf{z} (\mathbf{K} \cdot \mathbf{x})^T, \dot{\mathbf{B}}^M = \Delta \mathbf{z} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{u})^T. \quad (8)$$

$$\Delta \mathbf{z} = \Delta \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}^M \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{A} \mathbf{x} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u}. \quad (9)$$

$$\mathbf{z}(t) = -h \text{sigma}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); h > 0, \quad (10)$$

где \mathbf{K} , \mathbf{D} – диагональные матрицы положительных коэффициентов, $\Delta \dot{\mathbf{x}}$ – вектор рассогласования производных переменных состояния объекта и модели, $\Delta \mathbf{z}$ – наблюдаемый сигнал невязки между объектом и НМ. Сигнальная ветвь аналогична случаю нелинейной эталонной модели.

В данном случае параметры НМ будут соответствовать параметрам объекта управления независимо от влияющих на них внешних и внутренних факторов.

Настраиваемая модель с нейросетевой идентификацией

Представленный в предыдущем пункте алгоритм является достаточно сложным с точки зрения проводимых процедур вычисления. Для

упрощения процедуры идентификации выделим интересующие нас нелинейности и проведем процедуру идентификации в реальном времени с помощью нейронных сетей.

Структура нелинейной модели ГТУ представлена на рис. 2.

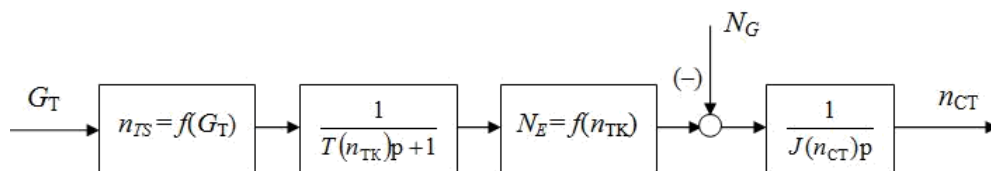


Рис. 2. Структура нелинейной модели

На рис. 2: $n_{TS} = f(G_T)$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование расхода топлива G_T (кг/ч) в обороты турбокомпрессора n_{TK} (об/мин); $T(n_{TK})$ – постоянная времени турбокомпрессора, зависящая от текущей частоты вращения турбокомпрессора; $N_E = f(n_{TK})$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование частоты вращения турбокомпрессора (об/мин) в мощность свободной турбины (кВт); N_G – мощность нагрузки (кВт); $J(n_{CT})$ – суммарный, приведенный к валу свободной турбины момент инерции; n_{CT} – частота вращения свободной турбины (об/мин) [22–25].

Уравнения, описывающие динамические звенья, на рис. 2 имеют следующий вид:

а) уравнение ротора турбокомпрессора:

$$\frac{dn_{TK}}{dt} = (n_{TS}(G_T) - n_{TK}) / T(n_{TK}); \quad (11)$$

б) уравнение свободной турбины:

$$\frac{dn_{CT}}{dt} = \frac{1}{n_{CT} J(n_{CT})} (N_E(n_{TK}) - N_G). \quad (12)$$

В процессе исследований [7, 8, 20] было установлено, что для обеспечения желаемой реакции ЭМ на возмущающие воздействия можно заменить зависимости $T(n_{TK})$ и $J(n_{CT})$ постоянными коэффициентами. Таким образом, нелинейности, которые необходимо идентифицировать, это $n_{TS} = f(G_T)$ и $N_E = f(n_{TK})$.

Для идентификации нелинейных статических характеристик применим однослойную нейронную сеть с функцией активации логистическая сигмоида [26]:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (13)$$

В качестве алгоритма настройки использован градиентный спуск. Достоинством класса сигмоидальных функций является то, что их производные легко выражаются через значения самих функций, чем упрощают процесс настройки весов нейронной сети.

Сравним результаты идентификации нелинейностей $n_{TS} = f(G_T)$ и $N_E = f(n_{TK})$, где объект соответствует уравнениям (11), (12). Для идентификации нелинейности использованы нейронные сети с одним входным и выходным нейроном, в скрытом слое используем один нейрон в первой сети и два нейрона во второй. Результаты идентификации представлены на рис. 3, 4.

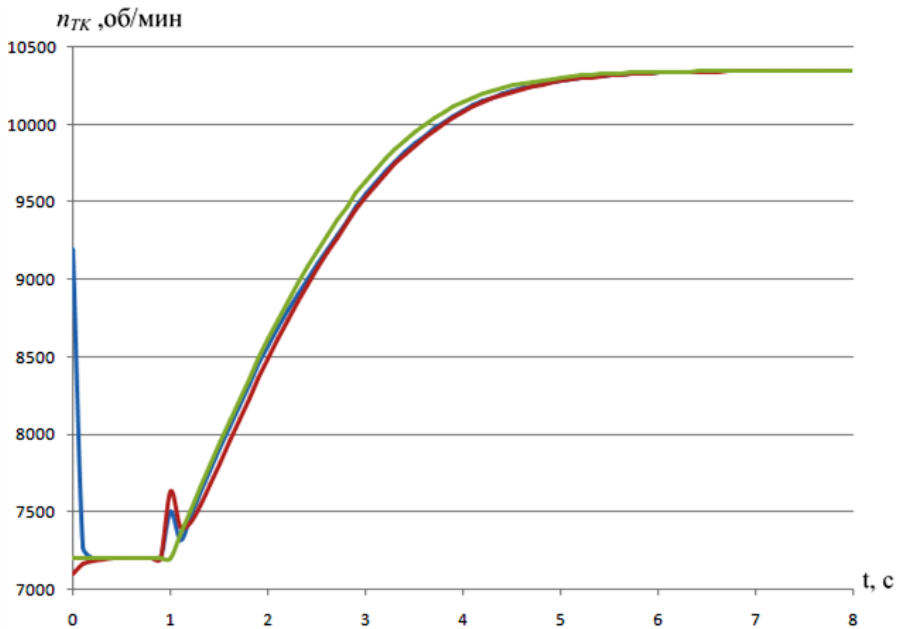


Рис. 3. Результаты идентификации в реальном времени $n_{TS} = f(G_T)$ с помощью нейронных сетей (зеленый – исходные данные, красный – нейронная сеть с одним нейроном в скрытом слое, синий – нейронная сеть с двумя нейронами в скрытом слое)

На рис. 3 приведены переходные процессы систем соответствующих уравнению (11). Входное воздействие – ступенчатое изменение расхода топлива в момент времени $t = 1$ с холостого хода до номинального режима. Начальное рассогласование вызвано случайной настройкой весовых коэффициентов. Значительное расхождение в момент вре-

мени $t = 1$ с вызвано мгновенным изменением входной переменной, при этом в случае двух нейронов в скрытом слое оно меньше. Учитывая характер процесса, можно предположить, что в результате идентификации будут сглаживаться шумы на используемых сигналах.

На рис. 4 результаты нейронных сетей с одним и двумя нейронами в скрытом слое сливаются, что позволяет говорить о незначительной разнице результатов.

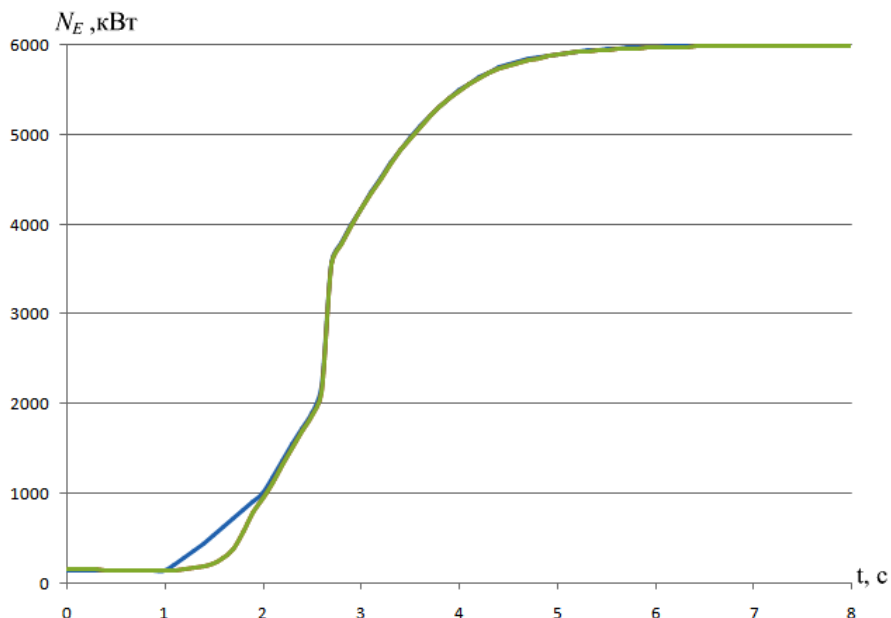


Рис. 4. Результаты идентификации $N_E = f(n_{TK})$ в реальном времени с помощью нейронных сетей (зеленый – исходные данные, красный – нейронная сеть с одним нейроном в скрытом слое, синий – нейронная сеть с двумя нейронами в скрытом слое)

Значение N_E для идентификации в реальном времени рассчитывается по уравнению (12) при фиксированном значении $J(n_{CT}) = \text{const}$.

Заключение

Применение нейронных сетей для идентификации параметров ГТУ в реальном времени является более простым процессом с точки зрения необходимых вычислений, поскольку в ранее рассмотренном варианте происходило одновременное изменение всех параметров матриц \mathbf{A}_M , \mathbf{B}_M и требовалось вычисление векторов производных объекта и модели. Для дальнейшего развития предложенного подхода предполагается подробное исследование влияния различных параметров ней-

ронной сети на результаты идентификации. Цель выполненных исследований – построение в перспективе адаптивной системы управления, в которой часть функций возьмет на себя искусственная нейронная сеть, что позволит с большей полнотой использовать все имеющиеся резервы существующих регуляторов САУ ГТУ для ГТЭС и тем самым добиться улучшения экологических показателей работы ГТЭС за счет сокращения вредных выбросов в ходе переходных процессов.

Библиографический список

1. Хижняков Ю.Н. Современные проблемы теории управления. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 237 с.
2. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
3. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Адаптивное управление параллельной работой синхронных генераторов с сетью бесконечной мощности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5. – С. 65–72.
4. Бахирев И.А., Басаргин Ш.Д., Кавалеров Б.В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигнальной настройкой // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 71–76.
5. 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. – № 62. – С. 235–240.
6. Бахирев И.В. Кавалеров Б.В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигмоидальной функцией // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3.1. – С. 118–123.
7. KavaleroV B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. An investigation of adaptive control of the rotation speed of gas turbine power plants // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87, № 11. – P. 607–611.
8. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Басаргин Ш.Д. Исследование параметрической адаптации регулятора газотурбинной установки электростанции мощностью 6 МВт // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11–2. – С. 281–285.

9. KavaleroV B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. Adaptive control of the rotational frequency of a gas-turbine unit using a tunable model // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, № 11. – P. 738–741.

10. Эйххофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 685 с.

11. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

12. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / В.Г. Августинович, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.

13. О процедуре идентификации математической модели воздушного потока [Электронный ресурс] / Д.А. Опарин, И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров, Г.А. Килин // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 3. – С. 70–75. – URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37943> (дата обращения: 28.12.2020).

14. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Идентификация в темпе переходного процесса при управлении электроэнергетической газотурбинной установкой // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – № 2(64). – С. 73–77.

15. Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation (Singapore: Person Education). – 1999.

16. Borisov V., Kruglov V., Artificial neural networks. Theory and practice. – Moscow: Hotline-Telecom, 2001.

17. Artificial Neural Network Based System Identification for a Single-Shaft Gas Turbine / H. Asgari, X. Chen, M. Menhaj, Sainudiin R. // J. of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2013. – 135(9). – 0902601.

18. Asgari H., Chen X., Sainudiin R. Modeling and simulation of gas turbines // Int. J. of Modeling, Identification and Control. – 2013. – 20(3). – P. 253–270.

19. Килин Г.А., Кавалеров Б.В., Ждановский Е.О. Получение и преобработка экспериментальных данных для создания обучающей выборки для нейронной сети // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2018. – С. 96–100.

20. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Параметрическое адаптивное управление электроэнергетической газотурбинной установкой // Тр. IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – 2016. – С. 158–160.

21. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модельным управлением. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отделение, 1984. – 216 с.

22. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 12–17.

23. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 100 с.

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

25. Кухарчук В.Г. Современные принципы построения комплексных систем управления авиационных газотурбинных двигателей. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1995. – 164 с.

26. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function // *Mathematics of Control, Signals and System*. – 1989. – 2 (4). – P. 303–314.

References

1. Khizhniakov Iu.N. *Sovremennye problemy teorii upravleniia* [Modern problems of control theory]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, 237 p.

2. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. Saint Petersburg: Nauka, 2000, 549 p.

3. Khizhniakov Iu.N., Iuzhakov A.A. *Adaptivnoe upravlenie parallel'noi rabotoi sinkhronnykh generatorov s set'iu beskonechnoi moshchnosti* [Adaptive control of parallel operation of synchronous generators with an infinite power network]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2011, no. 5, pp. 65-72.

4. Bakhirev I.A., Basargin Sh.D., Kavalеров B.V. *Adaptivnoe upravlenie gazoturbinnoi ustanovkoi s etalonnou model'iu i signal'noi nastroikoi* [Adaptive control of a gas turbine plant with a reference model and signal tuning]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2015, no. 2, pp. 71-76.

5. Ziiatdinov I.R., Kavalero B.V., Bakhirev I.V. Issledovanie sistemy upravleniia s etalonnou model'iu i signal'noi nastroi koi dlia elektroenergeticheskoi gazoturbinnou ustanovki [Study of a control system with a reference model and signal tuning for an electric power gas turbine plant]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 62, pp. 235-240.

6. Bakhirev I.V. Kavalero B.V. Adaptivnoe upravlenie gazoturbinnou ustanovki s etalonnou model'iu i sigmoidal'noi funktsiei [Adaptive control of a gas turbine plant with a reference model and a sigmoid function]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2015, no. 3.1, pp. 118-123.

7. Kavalero B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. An investigation of adaptive control of the rotation speed of gas turbine power plants. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 11, pp. 607-611.

8. Kavalero B.V., Bakhirev I.V., Basargin Sh.D. Issledovanie parametricheskoi adaptatsii regulatora gazoturbinnou ustanovki elektrostantsii moshchnost'iu 6 MVt [Investigation of the parametric adaptation of the controller of a gas turbine plant of a power plant with a capacity of 6 MW]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 11-2, pp. 281-285.

9. Kavalero B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. Adaptive control of the rotational frequency of a gas-turbine unit using a tunable model. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 11, pp. 738-741.

10. Eikkhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniia. Otsenivanie parametrov i sostoianiia [Fundamentals of identification of control systems. Parameter and state estimation]. Moscow: Mir, 1975, 685 p.

11. Deich A.M. Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [Methods for identifying dynamic objects]. Moscow: Energiia, 1979, 240 p.

12. Avgustinovich V.G., Akindinov V.A., Boev B.V. et al. Identifikatsiia sistem upravleniia aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei [Identification of control systems for aircraft gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 200 p.

13. Oparin D.A., Bakhirev I.V., Kavalero B.V., Kilin G.A. O protsedure identifikatsii matematicheskoi modeli vozdushnogo potoka [On the procedure for identifying the mathematical model of the air flow]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2020, no. 3, pp. 70-75, available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37943> (accessed 28 December 2020).

14. Bakhirev I.V., Kavalero B.V. Identifikatsiia v tempe perekhodnogo protsessa pri upravlenii elektroenergeticheskoi gazoturbinnou

ustanovkoi [Identification at the rate of the transient process in the control of an electric power gas turbine plant]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2016, no. 2(64), pp. 73-77.

15. Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation (Singapore: Person Education), 1999.

16. Borisov V., Kruglov V. Artificial neural networks. Theory and practice. Moscow: Hotline-Telecom, 2001.

17. Asgari H., Chen X., Menhaj M., Sainudiin R. Artificial Neural Network Based System Identification for a Single-Shaft Gas Turbine. *J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(9), 0902601.

18. Asgari H., Chen X. Sainudiin R. Modeling and simulation of gas turbines *Int. J. of Modeling, Identification and Control*, 2013, 20(3), pp. 253-270.

19. Kilin G.A., Kavalerov B.V., Zhdanovskii E.O. Poluchenie i predobrabotka eksperimental'nykh dannykh dlia sozdaniia obuchaiushchei vyborki dlia neuronnoi seti [Obtaining and preprocessing experimental data to create a training sample for a neural network]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriia, instrumenty, praktika*, 2018, pp. 96-100.

20. Kavalerov B.V., Bakhirev I.V. Parametricheskoe adaptivnoe upravlenie elektroenergeticheskoi gazoturbinnoi ustanovkoi [Parametric adaptive control of electric power gas turbine plant]. *Trudy IX Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*, 2016, pp. 158-160.

21. Bortsov Iu.A., Poliakhov N.D., Putov V.V. Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i model'nym upravleniem [Electromechanical systems with adaptive and model control]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1984, 216 p.

22. Kavalerov B.V. Avtomatizatsiia ispytanii SAU GTU gazoturbinnnykh mini-elektrostantsii pri proektirovanii i nastroiike [Automation of tests of ACS GTU gas turbine mini-power plants in the design and configuration]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2011, no. 1, pp. 12-17.

23. Gurevich O.S. Upravlenie aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigateliami [Aircraft Gas Turbine Engine Control: Tutorial]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 2001, 100 p.

24. Gol'berg F.D., Batenin A.V. Matematicheskie modeli gazoturbinnnykh dvigatelei kak ob"ektov upravleniia [Mathematical models of gas turbine engines as control objects]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 1999, 82 p.

25. Kukharchuk V.G. *Sovremennye printsipy postroeniia kompleksnykh sistem upravleniia aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [Modern principles of building complex control systems for aircraft gas turbine engines]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1995, 164 p.

26. Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and System*, 1989, 2 (4), pp. 303-314.

Сведения об авторах

Бахирев Иван Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bahirevy@mail.ru).

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

About the authors

Ivan V. Bakhirev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bahirevy@mail.ru).

Boris V. Kavalerov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, head of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Поступила: 25.10.2022. Одобрена: 07.11.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590012.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье

Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Бахирев, И.В. Применение нейросетевой идентификации для адаптивного управления газотурбинными электростанциями / И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 182–197. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.10

Please cite this article in English as:

Bakhirev I.V., KavaleroV B.V. Application of neural network identification for adaptive control of gas turbine power plants. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 182-197. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.10