

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.05

УДК 004.942

**Б.В. Кавалеров<sup>1</sup>, Е.А. Заборовцев<sup>1,2</sup>, М.А. Заборовцева<sup>1,3</sup>,  
Г.А. Килин<sup>1</sup>, А.И. Суслов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

<sup>2</sup>ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» Пермь, Россия

<sup>3</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»,  
Пермь, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ**

Электроэнергетика играет важнейшую роль в промышленности и обеспечении повседневной жизни населения. Основная проблема в данной области кроется в необходимости достижения требуемых показателей качества выработки электроэнергии, которые в значительной мере зависят от системы управления. Традиционным путем решения данной проблемы является использование математических моделей объектов управления, с помощью которых можно синтезировать и настраивать регуляторы системы автоматического управления. В последнее время все более широкое распространение получает использование искусственных нейронных сетей для синтеза моделей. Альтернативным вариантом использования искусственных нейронных сетей является их применение в качестве модели устройства управления в составе системы автоматического управления. **Цель исследования:** разработка нейросетевого регулятора синхронным генераторам для улучшения показателей качества выработки электроэнергии. **Результаты:** в статье для исследования применения искусственных нейронных сетей в задачах выработки электроэнергии был выбран регулятор возбуждения синхронного генератора как основного и существенного элемента системы электроснабжения. Рассматривается построение нейрорегулятора для системы возбуждения синхронного генератора на основе метода подражающего нейроуправления. Проведены эксперименты для получения обучающего набора данных. Предложена искусственная нейронная сеть с заданным количеством нейронов в входном и выходном слое, выполнено ее обучение. Результаты обучения проверены в замкнутом контуре при работе синхронного генератора на выделенную статическую нагрузку. В результате удалось получить существенное улучшение качества переходного процесса по напряжению в системе «синхронный генератор – статическая нагрузка» и добиться автоматизации процессов синтеза и настройки регулятора за счет применения нейросетевых технологий.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, синхронный генератор, показатели качества, система автоматического управления, математическая модель, испытания, объект управления, устройство управления, искусственные нейронные сети.

**B.V. Kavalero<sup>1</sup>, E.A. Zaborovtsev<sup>1,2</sup>, M.A. Zaborovtseva<sup>1,3</sup>,  
G.A. Kilin<sup>1</sup>, A.I. Suslov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>ООО "LUKOIL-PERM", Perm, Russian Federation

<sup>3</sup>PAO "Perm Scientific and Production Instrument-Making Company",  
Perm, Russian Federation

## **APPLICATION OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK IN THE TASK OF CONTROLLING A SYNCHRONOUS GENERATOR**

Electric power industry plays a crucial role in industry and ensuring the daily life of the population. The main problem in this area lies in the need to achieve the required indicators of the quality of electricity generation, which largely depend on the management system. The traditional way to solve this problem is to use mathematical models of control objects, with the help of which it is possible to synthesize and configure the automatic control system regulators. Recently, the use of artificial neural networks for model synthesis has become increasingly widespread. An alternative way to use artificial neural networks is to use them as a control device model as automatic control system part. **Purpose:** to develop a neural network controller for synchronous generators to improve the quality of electricity generation. **Results:** in the article, to study the artificial neural networks use in power generation tasks, a synchronous generator excitation regulator was selected as the main and essential power supply system element. The neuroregulator construction for a synchronous generator excitation system based on the imitating neurocontrol method is considered. Experiments were carried out to obtain a training data set. An artificial neural network with a given number of neurons in the input and output layers is proposed, and its training are performed. The learning results are tested in a closed loop when the synchronous generator is operating on a dedicated static load. As a result, it was possible to obtain a significant improvement in the voltage transition process quality in the "synchronous generator – static load" system and to achieve automation of the synthesis and adjustment of the regulator through the use of neural network technologies.

**Keywords:** electric power industry, synchronous generator, quality indicators, automatic control system, mathematical model, tests, control object, control device, artificial neural networks.

### **Введение**

Синхронные генераторы производят электроэнергию на электростанциях различного принципа действия и разной мощности. При работе в составе электростанций синхронные генераторы нуждаются в специально организованном управлении для обеспечения надежной и устойчивой работы и получения требуемых стандартами и нормами показателей качества электроэнергии. Двумя основными способами управления синхронным генератором являются: а) управление со стороны первичного двигателя для регулирования частоты вращения; б) управление со стороны обмотки возбуждения для регулирования электродвижущей силы генератора. При этом вращающий момент, как правило, регулируется со стороны первичного двигателя за счет изменения

расхода топлива. Поэтому далее рассматривается управление со стороны обмотки возбуждения синхронного генератора (СГ), которое выполняется автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) СГ. АРВ воздействует на систему возбуждения синхронных генераторов, которые могут иметь различную конструкцию.

Также существенен режим работы СГ, например, он может работать параллельно мощной сети или автономно на выделенную нагрузку. При автономной работе СГ существенна роль АРВ, поэтому в дальнейшем рассмотрим именно этот режим. Синхронный генератор рассматривается работающим на соизмеримую по мощности активно-индуктивную статическую нагрузку с высоким  $\cos\varphi$  и с последующим ступенчатым сбросом активной нагрузки.

Известно, что АРВ различаются алгоритмами функционирования, они могут быть пропорциональные или сильного действия. В настоящей статье, имеющей исследовательский характер, для регулирования напряжения в системе «СГ – статическая нагрузка» использован опытный простейший регулятор. Для него сигнал ошибки вырабатывается путем сравнения заданного напряжения и действительного напряжения на внешних зажимах генератора. Для этого используется классический ПИД-регулятор [1, 2]. Отметим, что обычный ПИД-регулятор не способен адаптироваться под изменяющиеся условия нелинейной и нестационарной системы, следовательно, – гарантированно обеспечивать ее стабильность [3]. Такой системой, например, является газотурбинная электростанция (ГТЭС), имеющая в своем составе синхронный генератор [4–7]. Одной из проблем эффективного функционирования данной системы является проблема согласованной работы САУ СГ и САУ газотурбинного двигателя [8, 9], что предъявляет дополнительные требования к синтезу регуляторов САУ.

Поэтому для достижения необходимых показателей качества выработки электроэнергии [10] в настоящей статье исследуются возможность и перспективность использования нейрорегуляторов (НР) для осуществления нейрорегулирования [11–14], в частности, подражающего нейрорегулирования [11].

## **1. Подражающее нейрорегулирование**

Подражающее нейрорегулирование [11] охватывает системы нейрорегулирования, в которых нейроконтроллер обучается на примерах динамики обычного контроллера по обратной связи, построенного, напри-

мер, на основе обычной ПИД-схемы управления (рис. 1). Важной особенностью нейроуправления является тот факт, что в качестве примеров динамики контроллера может быть использована запись поведения человека-оператора [11].

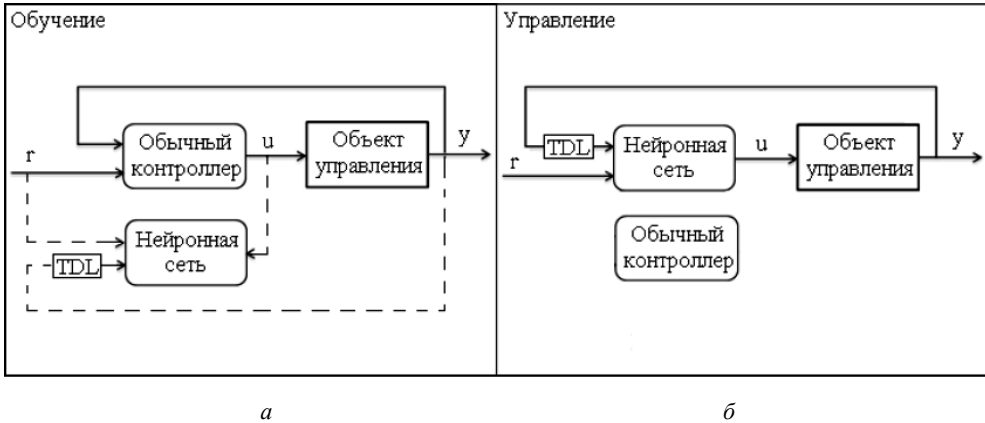


Рис. 1. Схема подражающего нейроуправления: режим обучения нейронной сети (а); режим управления (б);  $TDL$  – временная задержка сигнала;  $r$  – сигнал задания;  $u$  – управляющее воздействие;  $y$  – выходная (контролируемая) величина

После обучения с помощью, например, метода обратного распространения ошибки нейронная сеть подключается вместо исходного контроллера. Для достижения цели улучшения показателей качества выработки электроэнергии с использованием нейроуправления необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести эксперименты с классическим регулятором для формирования обучающей выборки;
- 2) выбрать архитектуру, параметры структуры и гиперпараметры ИНС;
- 3) обучить искусственную нейронную сеть на сформированной обучающей выборке;
- 4) проверить работоспособность нейрорегулятора в задаче выработки электроэнергии СГ.

## **2. Проведение экспериментов для формирования обучающих данных**

Для построения нейросетевых математических моделей необходимо наличие репрезентативных экспериментальных данных и нейронной сети, архитектура которой позволит за короткий промежуток времени

обучить ее на этих экспериментальных данных. В обучении и заключается принципиальное отличие нейросетевого подхода от классических подходов [15–17]. В качестве базовой архитектуры нейронной сети был выбран многослойный персептрон, так как он хорошо себя зарекомендовал в задачах получения математических моделей [18–22] и является достаточно простым для понимания [23–25] и программной реализации.

Экспериментальные данные для обучения искусственной нейронной сети были получены с использованием программного комплекса КМЭС [26] для режима работы СГ при ступенчатом сбросе нагрузки с 1000 кВт до определенного минимального значения. В первом эксперименте это значение составляло 900 кВт, затем в каждом последующем минимальное значение уменьшалось на 100 кВт (рис. 2).

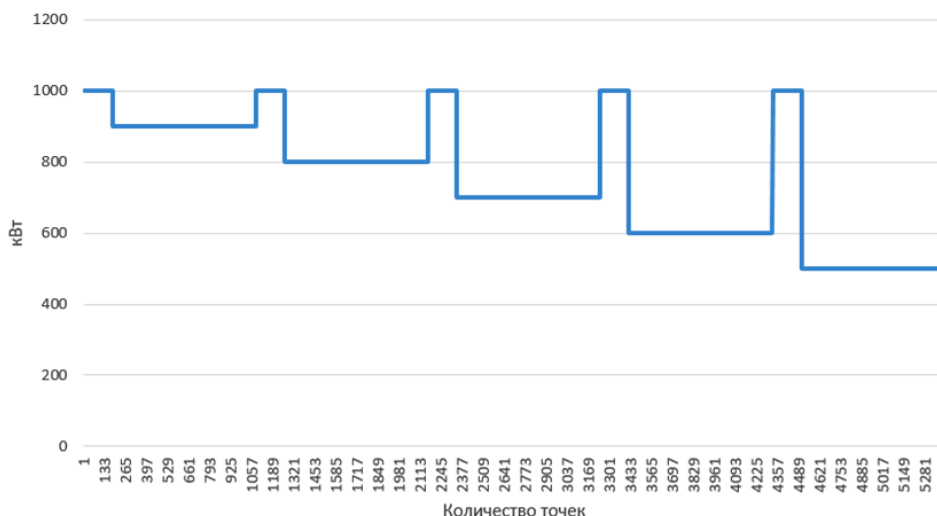


Рис. 2. Изменение мощности нагрузки

На рис. 3 и 4 в качестве примера показаны изменения действующего линейного напряжения и активной вырабатываемой мощности СГ, которые использовались в качестве обучающих данных, характеризующих изменение двух входных параметров искусственной нейронной сети (ИНС), а также изменения напряжения (рис. 5) обмотки возбуждения (выходной параметр сети). Общий объем выборки составляет 5300 точек (для каждого параметра).

Общая структурная схема ИНС для управления СГ с обозначением всех входных и выходных параметров приведена на рис. 6.

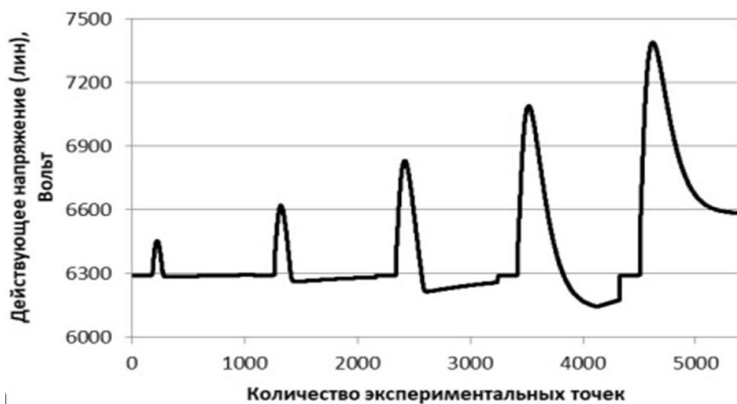


Рис. 3. Действующее линейное напряжение

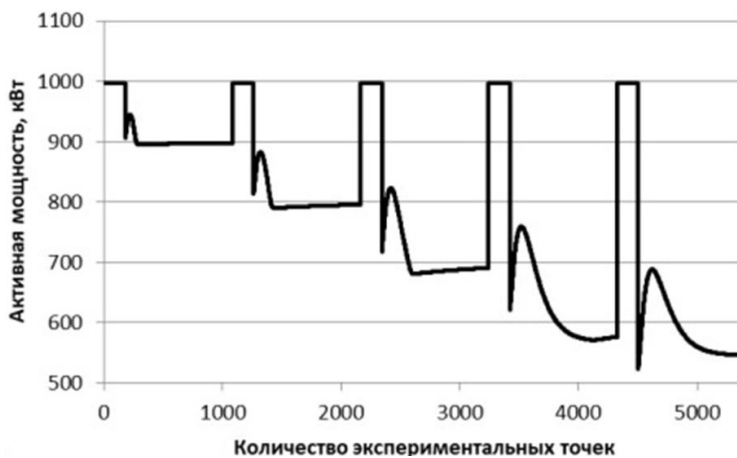


Рис. 4. Вырабатываемая активная мощность СГ

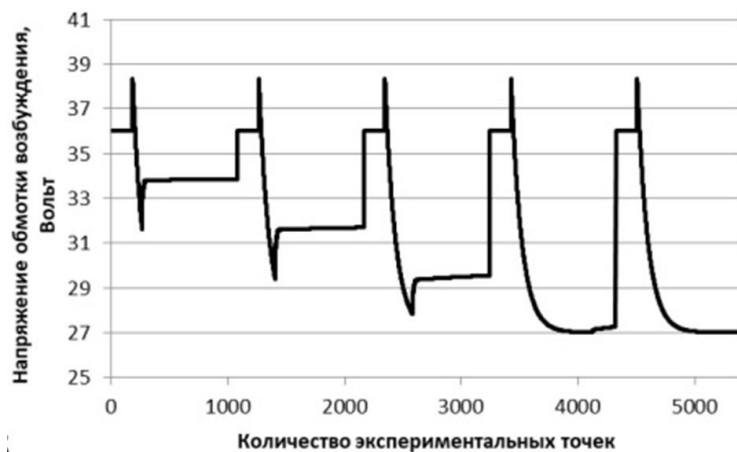


Рис. 5. Напряжение обмотки возбуждения

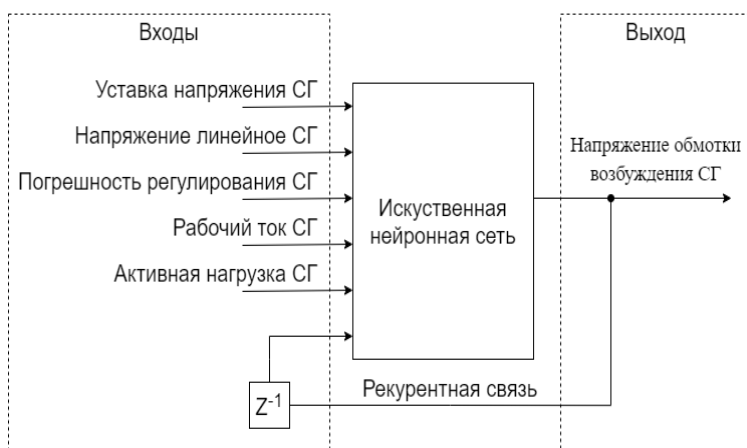


Рис. 6. Схема ИНС для управления СТ

### 3. Процедура обучения искусственной нейронной сети

Для получения ИНС было проведено несколько экспериментов с различной архитектурой нейросети, в ходе которых изменялись количество нейронов в скрытых слоях, количество скрытых слоев, а также глубина обратных связей. На основе анализа полученных результатов была выбрана архитектура ИНС с 2 скрытыми слоями по 20 нейронов в каждом слое, без обратных связей. На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных данных (значений напряжения обмотки возбуждения СТ) и данных, полученных при помощи обученной ИНС. Мера адекватности ИНС по критерию Тейла составляет 0,087 (меньше требуемых 0,1) [27], что достаточно для использования ИНС в качестве нейросетевого регулятора.

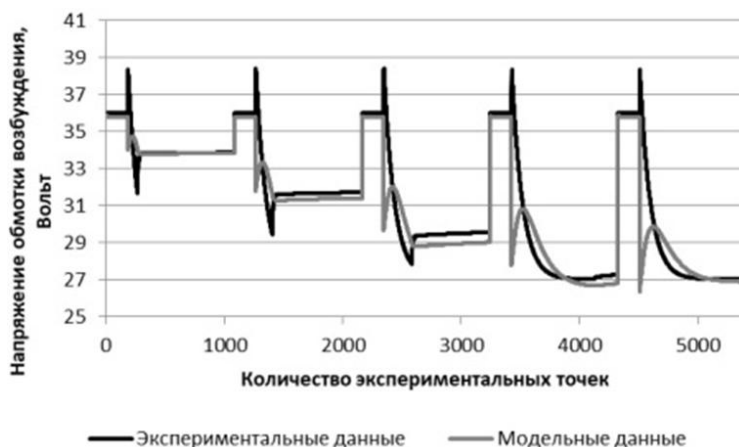


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и модельных данных

#### 4. Проверка в замкнутом контуре

Для проверки работоспособности искусственной нейронной сети в качестве регулятора СГ был выбран режим сброса мощности нагрузки с 1000 до 600 кВт. На рис. 8 показано сравнение переходного процесса для действующего линейного напряжения при использовании классического регулятора и нейросетевого регулятора.

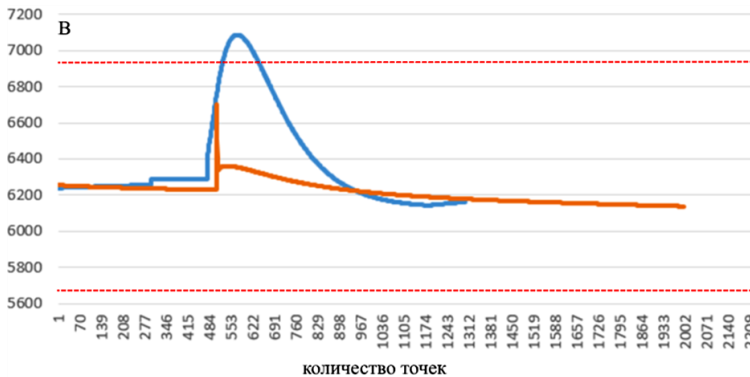


Рис. 8. Сравнение изменения напряжения в регулируемом СГ (синяя линия – классический регулятор; оранжевая линия – нейросетевой регулятор, красным пунктиром обозначена граница 10 % отклонения от заданного значения в 6300 В)

По результатам проверки нейросетевого регулятора видно, что удалось добиться существенного улучшения показателей качества выработки электроэнергии по напряжению:

1) в случае с классическим управлением время перенапряжения составляло более одной секунды (в качестве времени перенапряжения взято время выхода за 10%-ную зону (см. рис. 7) от величины установившегося значения [10]). В случае нейроуправления отклонения напряжения за допустимые пределы не происходило;

2) снизилась величина максимального отклонения с 787 до 403 В, достигнуто улучшение на 49 %.

#### Заключение

Полученные результаты подтвердили предположение о возможности регулирования СГ с помощью обученной НР, что снижает трудоемкость процесса разработки и настройки регулятора СГ. Снижение трудоемкости выражается в том, что для настройки нейросетевого регулятора СГ под новый режим работы СГ на конкретную нагрузку вместо



настройки классического регулятора необходимо только обучить ИНС. Для обучения использовались экспериментальные данные, а сама процедура обучения производилась в автоматическом режиме. Разработчик участвовал только на начальном этапе при создании обучающей выборки, определении параметров архитектуры и гиперпараметров ИНС [28, 29], критериев останова обучения.

Практическая значимость результатов заключается в возможности достижения улучшения показателей качества электроэнергии с использованием нейрорегулятора по сравнению с классическими регуляторами.

Новизна исследования заключается в создании и обосновании архитектуры искусственной нейронной сети для нейроуправления СГ и в исследовании этого нейроуправления на примере сброса электрической нагрузки СГ. Полученные результаты возможно в дальнейшем использовать для управления СГ в других режимах работы или для управления иными объектами, например ГТУ.

### **Библиографический список**

1. Баландин Д.В., Городецкий С.Ю. Классические и современные методы построения регуляторов в примерах: электронное учебно-метод. пособие. – Н. Новгород, 2012.
2. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 685 с.
3. Бобцов А.А., Пыркин А.А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей. – СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2013. – 135 с.
4. Фахразиев И.З., Зацаринная Ю.Н. Экономические и технологические преимущества использования газотурбинных установок на ТЭС // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 291–292.
5. Галашов Н.Н. Эффективность применения газовых турбин на ТЭС для привода собственных нужд // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 48–50.
6. Газотурбинные электростанции (ГТЭС) [Электронный ресурс] // Все об электротехнике. – URL: [http://www.gigavat.com/pgu\\_gtes.php](http://www.gigavat.com/pgu_gtes.php) (дата обращения: 20.10.2022).
7. Газотурбинные установки [Электронный ресурс]: Выставка электрооборудования. – URL: <https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/gazoturbinnay>.(датаобращения: 25.10.2022).

8. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 14–17.

9. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7, № 11. – С. 129–132.

10. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 05.11.2022).

11. Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. Обзор методов нейроруправления // Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79–94.

12. Харченко И.В. Нейроруправление // Электромеханотроника и управление. – 2020. – С. 53–53.

13. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроруправление и его приложения. – М.: ИПРЖР, 2000. – С. 121–132.

14. Моделирование нейроруправления скоростью дождевальных машин / Д.А. Соловьев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 7. – С. 81–84.

15. Воскобойников Д.В. Имитационное моделирование физических процессов основных систем ГТУ с конвертированными авиационными ГТД // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–18. – С. 3926–3930.

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

17. Жернаков С.В., Равилов Р.Ф. Идентификация обратной много-режимной модели ГТД по параметрам его масляной системы на основе технологии нейронных сетей // Вестник Ижевск. гос. техн. ун-та им. М.Т. Калашникова. – 2011. – № 3. – С. 126–129.

18. Килин Г.А., Кавалеров Б.В. Разработка математической модели газотурбинной электростанции на основе технологии нейронных сетей // Климовские чтения – 2016: перспективные направления развития двигателестроения: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Скифия-принт, 2016. – С. 229–233.

19. Килин Г.А., Кавалеров Б.В. Перспективы использования нейросетевых технологий в задаче получения математических моделей системы «газотурбинная установка – синхронный генератор» // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 51–55.

20. Килин Г.А. Преимущества нейронных сетей в задачах получения математических моделей ГТУ-ЭЭС // Тр. IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизирован. электроприводу АЭП–2016: г. Пермь, 3–7 октября 2016 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 52–55.

21. Килин Г.А., Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В. Использование нейросетевой модели для настройки автоматических регуляторов газотурбинной электростанции // Известия Урал. гос. горного ун-та. – 2016. – С. 66–69.

22. Ждановский Е.О., Кавалеров Б.В., Килин Г.А. Разработка нейросетевой модели газотурбинной электростанции для настройки регуляторов газотурбинной установки // Фундаментальные исследования. – 2017. – Т. 3, № 12. – С. 479–485.

23. Роберт К. Основные концепции нейронных сетей: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.

24. Нейронные сети для начинающих: многопредмет. науч. электрон. журнал [Электронный ресурс]. – URL: <https://m.habr.com/ru/post/312450/> (дата обращения: 29.04.2020).

25. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

26. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети»: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2011611839 РФ / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов, К.А. Один, А.И. Полулях, А.С. Ситников, И.Г. Лисовин, Е.Н. Ширинкина (дата регистрации: 28.02.2011).

27. Тейл Г. Экономические прогнозы и принятие решений // Статистика. – 1971. – 488 с.

28. Абрамов Р.В. Гиперпараметры нейронных сетей // Научно-исследовательская работа обучающихся и молодых ученых. – 2018. – С. 270–272.

29. Шолтанюк С.В. Влияние гиперпараметров нейронной сети на её численную обусловленность // Цифровая трансформация. – 2020. – № 1. – С. 43–50.

## References

1. Balandin D.V., Gorodetskii S.Iu. Klassicheskie i sovremennye metody postroeniia regulatorov v primerakh [Classical and modern methods for constructing controllers in examples]. Nizhnii Novgorod, 2012.

2. Eikkhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniia. Otsenivanie parametrov i sostoiianiia [Fundamentals of identification of control systems. Estimation of parameters and state]. Moscow: Mir, 1975, 685 p.

3. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. Adaptivnoe i robastnoe upravlenie s kompensatsiei neopredelennosti [Adaptive and robust control with uncertainty compensation]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii natsional'nyi issledovatel'skii universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2013, 135 p.

4. Fakhriziev I.Z., Zatsarinnaia Iu.N. Ekonomicheskie i tekhnologicheskie preimushchestva ispol'zovaniia gazoturbinnnykh ustanovok na TES [Economic and technological advantages of using gas turbine installations at thermal power plants]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, pp 3, pp. 291-292.

5. Galashov N.N. Effektivnost' primeneniia gazovykh turbin na TES dlia privoda sobstvennykh nuzhd [Efficiency of using gas turbines at thermal power plants to drive their own needs]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 4, pp. 48-50.

6. Gazoturbinnye elektrostantsii (GTES) [Gas turbine power plants]. *Vse ob elektrotekhnike*, available at: [http://www.gigavat.com/pgu\\_gtes.php](http://www.gigavat.com/pgu_gtes.php) (accessed 20 October 2022).

7. Gazoturbinnye ustanovki [Gas turbine installations]. *Vystavka elektrooborudovaniia*, available at: <https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/gazoturbinnay>.(accessed 25 October 2022).

8. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., Kavalerov B.V., Shigapov A.A. Avtomatizatsiia nastroiiki regulatorov gazoturbinnnykh mini-elektrostantsii pri komp'iuternykh ispytaniiax [Automation of adjustment of regulators of gas-turbine mini-power plants during computer tests]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2011, no. 6, pp. 14-17.

9. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., Kavalerov B.V., Shigapov A.A. Issledovanie vzaimovliianiia sistem upravleniia gazoturbinnoi ustanovkoi i elektrogeneratorom pri avtomatizirovannoi nastroiike regulatorov [Study of the mutual influence of control systems of a gas turbine plant and an electric generator with automated adjustment of regulators]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 11, pp. 129-132.

10. GOST 32144-2013. Elektricheskaiia energiiia. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniia [GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems], available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (accessed 25 November 2022).

11. Chernodub A.N., Dziuba D.A. Obzor metodov neiroupravleniia [Review of neurocontrol methods]. *Problemy programmirovaniia*, 2011, no. 2, pp. 79-94.

12. Kharchenko I.V. Neiroupravlenie [Neurocontrol]. *Elektromekhanotronika i upravlenie*, 2020, pp. 53-53.

13. Omatu S., Khalid M., Iusof R. Neiroupravlenie i ego prilozheniia [Neurofeedback and its applications]. Moscow: IPRZhR, 2000, pp. 121-132.

14. Solov'ev D.A. et al. Modelirovanie neiroupravleniia skorost'iu dozhdeval'nykh mashin [Modeling the neurocontrol of the speed of spring machines]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2020, no. 7, pp. 81-84.

15. Voskoboinikov D.V. Imitatsionnoe modelirovanie fizicheskikh protsessov osnovnykh sistem GTU s konvertirovannymi aviatsionnymi GTD [Simulation of the physical processes of the main systems of gas turbines with converted aviation gas turbine engines]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 2-18, pp. 3926-3930.

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

17. Zhernakov S.V., Ravilov R.F. Identifikatsiia obratnoi mnogorezhimnoi modeli GTD po parametram ego maslianoi sistemy na osnove tekhnologii neironnykh setei [Identification of a reverse multi-mode model of a gas turbine engine by the parameters of its oil system based on neural network technology]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*, 2011, no. 3, pp. 126-129.

18. Kilin G.A., Kavalеров B.V. Razrabotka matematicheskoi modeli gazoturbinoi elektrostantsii na osnove tekhnologii neironnykh setei [Development of a mathematical model of a gas turbine power plant based on the technology of neural network]. *Klimovskie chteniia - 2016: perspektivnye napravleniia razvitiia dvigatelestroeniia. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Saint Petersburg: Skifiia-print, 2016, pp. 229-233.

19. Kilin G.A., Kavalero B.V. Perspektivy ispol'zovaniia neirosetevykh tekhnologii v zadache polucheniia matematicheskikh modelei sistemy "gazoturbinnaiia ustanovka - sinkhronnyi generator" [Prospects for the use of neural network technologies in the problem of obtaining mathematical models of the system "gas turbine plant - synchronous generator"]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2016, vol. 1, pp. 51-55.

20. Kilin G.A. Preimushchestva neironnykh setei v zadachakh polucheniia matematicheskikh modelei GTU-EES [The advantages of neural networks in the problems of obtaining mathematical models of the GTU-SG system]. *Trudy IX Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016; Perm', 3-7 Oktober 2016*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016, pp. 52-55.

21. Kilin G.A., Ziatdinov I.R., Kavalero B.V. Ispol'zovanie neirosetevoi modeli dlia nastroiки avtomaticheskikh reguliatorov gazoturbinnoi elektrostantsii [Using a neural network model for setting up automatic controllers of a gas turbine power plant]. *Izvestiia Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2016, pp. 66-69.

22. Zhdanovskii E.O., Kavalero B.V., Kilin G.A. Razrabotka neirosetevoi modeli gazoturbinnoi elektrostantsii dlia nastroiки reguliatorov gazoturbinnoi ustanovki [Development of a neural network model of a gas turbine power plant for adjusting the regulators of a gas turbine plant]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2017, vol. 3, no. 12, pp. 479-485.

23. Robert K. Osnovnye kontseptsii neironnykh setei [Basic concepts of neural networks]. Moscow: Vil'iams, 2001, 288 p.

24. Neironnye seti dlia nachinaiushchikh: mnogopredmetnyi nauchnyi elektronnyi zhurnal [Neural networks for beginners: multi-subject scientific electronic journal], available at: <https://m.habr.com/ru/post/312450/> (accessed 29 April 2020).

25. Khaikin S. Neironnye seti: polnyi kurs [Neural networks a complete course]. 2nd ed. Moscow: Vil'iams, 2006, 1104 p.

26. Petrochenkov A.B., Kavalero B.V., Shigapov A.A., Odin K.A., Poluliakh A.I., Sitnikov A.S., Lisovin I.G., Shirinkina E.N. Programmnyi kompleks "Kompleks matematicheskikh modelei elektrogeneratora i elektroseti" [Software complex "Complex of mathematical models of electric generator and power grid"]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM Rossiiskaia Federatsiia no. 2011611839 (2011).

27. Teil G. Ekonomicheskie prognozy i priniatie reshenii [Economic forecasts and decision-making]. *Statistika*, 1971, 488 p.

28. Abramov R.V. Giperparametry neuronnykh setei [Hyperparameters of neural networks]. *Nauchno-issledovatel'skaia rabota obuchaiushchikhsia i molodykh uchenykh*, 2018, pp. 270-272.

29. Sholtaniuk S.V. Vliianie giperparametrov neuronnoi seti na ee chislennuiu obuslovlennost' [Influence of neural network hyperparameters on its numerical conditionality]. *Tsifrovaia transformatsiia*, 2020, no. 1, pp. 43-50.

### **Сведения об авторах**

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

**Заборцев Евгений Андреевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: zbrvtsv@ya.ru); ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», инженер-энергетик 1-й категории, Оса.

**Заборцева Марина Алексеевна** (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: KolpMA@yandex.ru); ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Завод электроники, инженер-технолог (614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106).

**Килин Григорий Александрович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: thisisforasm@rambler.ru).

**Суслов Артем Игоревич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: suslov\_ai@mail.ru).

### **About the authors**

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

**Evgeny A. Zaborovtsev** (Perm, Russian Federation) – Student of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: zbrvtsv@ya.ru); LUKOIL-PERM LLC, power engineer of the 1st category, Osa.

**Marina A. Zaborovtseva** (Perm, Russian Federation) – Student of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: KolpMA@yandex.ru); PJSC Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, Electronics Plant, process engineer (106 October 25, Perm, 614990).

**Grigory A. Kilin** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: thisisforasm@rambler.ru).

**Artem I. Suslov** (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: suslov\_ai@mail.ru).

Поступила: 04.11.2022. Одобрена: 15.11.2022. Принята к публикации: 01.12.2022.

**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.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Применение искусственной нейронной сети в задаче управления синхронным генератором / Б.В. Кавалеров, Е.А. Заборовцев, М.А. Заборовцева, Г.А. Килин, А.И. Суслов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 80–95. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.05

Please cite this article in English as:

Kavalerov B.V., Zaborovtsev E.A., Zaborovtseva M.A., Kilin G.A., Suslov A.I. Application of an artificial neural network in the task of controlling a synchronous generator. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 44, pp. 80-95. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.05