

Научная статья
УДК 004.896:621.311
DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-9

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕПРЯМОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ КАК ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Екатерина Александровна Энгель¹✉, Никита Евгеньевич Энгель²

^{1, 2}Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия

¹ekaterina.en@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

²nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Аннотация. Прогноз вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции позволяет эффективно и безопасно управлять электрическими сетями, интегрирующими кластер солнечных электростанций. Штрафные тарифы закупки рынка «сутки вперед» электроэнергии солнечных электростанций, отклоняющейся более чем на 5% максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового макета рынка «сутки вперед» выработки солнечной электростанции, актуализируют повышение точности макета рынка «сутки вперед» путем создания эффективных интеллектуальных систем прогнозирования выработки солнечной электростанции. Проведенный анализ существующего программного обеспечения показал отсутствие доступного программного обеспечения для эффективного прогноза выработки солнечной электростанции, целесообразность и актуальность создания ПО, реализующего интеллектуальную систему прогнозирования выработки солнечной электростанции. В настоящем исследовании разработана, апробирована и реализована как программа для ЭВМ на основе модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания интеллектуальная система непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции. В нотации UML CASE-средством Microsoft Visio созданы диаграмма классов и блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей интеллектуальную систему непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции. Гибкость созданной программы для ЭВМ обеспечивает блочно-модульная архитектура. Апробация программы для ЭВМ, реализующей интеллектуальную систему непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции, отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для построения макетов рынка «сутки вперед». База данных SCADA солнечной электростанции легко интегрируется с интеллектуальной системой непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции.

Ключевые слова: нечеткая нейросеть, механизм внимания, рекуррентная нейросеть, UML

Благодарности: исследование выполнено в рамках мероприятия «Разработка интеллектуальных систем прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе оригинальной модифицированной нечеткой нейросети, их реализация как программ для ЭВМ и внедрение на электростанции возобновляемых источников энергии» программы деятельности НОЦ мирового уровня «Енисейская Сибирь».

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 91 от 13.12.22) научно-исследовательский проект «Разработка интеллектуальной системы непрямого прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе модифицированной нечеткой нейросети».

Для цитирования: Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Реализация интеллектуальной системы непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции как программы для ЭВМ // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 1. С. 68–74. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-9.

Original article

IMPLEMENTING AN INTELLIGENT SYSTEM OF INDIRECT FORECASTING OF SOLAR POWER GENERATION AS COMPUTER SOFTWARE

Ekaterina A. Engel¹✉, Nikita E. Engel²

^{1,2}Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

¹ekaterina.en@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

²nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Abstract. The forecasting of electric power generated by a solar power plant enables effective and safe control over electric networks which integrate a cluster of solar power plants. Penalty rates for the purchase of solar power at the day-ahead market, which deviates by more than 5 % of the maximum capacity of solar power plants from the provided hourly model of the day-ahead market of solar power generation, update the accuracy of the day-ahead market model through effective intelligent systems for forecasting solar power generation. It has been found that there is no accessible software for successful forecasting of solar power generation; the advisability and relevance of designing such software with an intelligent system have been shown based on the findings of the examined existing software. The study developed, tested and implemented an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation in the form of computer software designed based on a modified fuzzy neural network with an attention mechanism. A class diagram and a block-modular architecture for computer software that implements an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation were developed in UML notes using the Microsoft Visio CASE tool. A block-modular architecture provides the flexibility of computer software. The computer software implementing an intelligent system of indirect forecasting for solar power generation was tested for effectiveness, robust results, and the advisability of its application for building a day-ahead market model. The SCADA database of a solar power plant can be easily integrated with an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation.

Keywords: fuzzy neural network, attention mechanism, recurrent neural network, UML

Acknowledgments: the research is conducted as part of the event “The Development of Intelligent Systems of Forecasting and Maximizing Solar Power Generation Based on the Original Modified Fuzzy Neural Network, Their Implementation as Computer Software and Introduction of Renewable Energy Sources to the Power Plant” of the action program of the ANO “Yenisey Siberia Development Corporation”.

Funding: the study is supported by the grant of the Ministry of Education and Science of the Republic of Khakassia (Agreement No. 91 of December 13, 2022) of a research project “Development of an Intelligent System of Indirect Forecasting of Electric Power Generation by a Solar Power Plant Based on the Modified Fuzzy Neural Network”.

For citation: Engel E. A., Engel N. E. Implementing an intelligent system of indirect forecasting of solar power generation as computer software. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(1):68–74. DOI 10.35266/1999-7604-2024-1-9.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с несколькими приоритетами научно-технологического развития РФ (20 а, б) [1] актуальны результаты данного научного исследования, развивающие интеллектуальные системы солнечной электроэнергетики в Российской Федерации, в том числе для Республики Хакасия, имеющей богатый природный потенциал для увеличения мощности сети солнечных электростанций (величина инсоляции соответствует уровню инсоляции

Краснодарского края [2]). Прогноз вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции позволяет эффективно и безопасно управлять электрическими сетями, интегрирующими кластер солнечных электростанций [3]. Штрафные тарифы закупки рынка «сутки вперед» электроэнергии солнечных электростанций, отклоняющейся более чем на 5% максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового максимума рынка «сутки вперед» вырабатываемой

электроэнергии солнечной электростанции, актуализируют повышение точности макета рынка «сутки вперед» путем создания эффективных интеллектуальных систем прогнозирования выработки солнечной электростанции. Нелинейную динамику выработки солнечной электростанции, зависящую от колебаний инсоляции и температуры воздуха линейно и нелинейно соответственно [4], сложно прогнозировать традиционными алгоритмами, в то время как интеллектуальные системы прогнозирования выработки солнечной электростанции в отличие от классических, например интегрированной авторегрессии и т. д., имеют следующие достоинства: допустимую погрешность макета рынка «сутки вперед», оптимальное управление сегментом солнечных электростанций электрических сетей. Интеллектуальные системы, основанные на нейросетях, имеют преимущество параллельных вычислений, в том числе с использованием современных графических процессоров, что значительно снижает временные затраты на обработку больших данных SCADA для прогноза выработки электроэнергии солнечной электростанции [3].

Существующее программное обеспечение (ПО), ориентированное на проектирование солнечных электростанций, выдает примерную среднемесячную вырабатываемую электроэнергию солнечной электростанции для заданной широты и долготы места.

SolarSoft: это ПО для проектирования солнечных электростанций, предлагающее инструменты для моделирования, выполнения расчетов и создания 3D-макета установки [5].

Solar Array Simulator: это ПО, которое позволяет создавать и тестировать макеты солнечных батарей и электростанций в виртуальном пространстве [6].

NREL System Advisor Model (SAM): позволяет проводить технологически сложные моделирования и анализ возможностей солнечных электростанций с учетом географических особенностей, климата и других факторов [7].

Helioscope: это ПО для проектирования солнечных электростанций, которое также обеспечивает возможности для оптимизации и анализа производства энергии [8].

ПО Aurora Solar предоставляет инструменты для оптимизации установки солнечных панелей с учетом тени от окружающих объектов и других факторов, влияющих на производительность солнечных панелей [9].

Средства Photovoltaic Geographical Information System – Interactive Maps [10] позволяют вычислить среднемесячные значения температуры, солнечной радиации ($\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) и выработки солнечной электростанции ($\text{kВт}\cdot\text{ч}$), соответствующие широте и долготе местоположения солнечной электростанции.

SolarServer – PV forecast Europe обеспечивает для заданной широты и долготы местности оптимизацию угла установки, ориентации панелей, а также онлайн-прогнозирование выработки солнечной электростанции [11].

PVsyst представляет собой ПО, обладающее широким спектром моделирования различных фотоэлектрических массивов в разных условиях [12].

Clean Power Research – это компания, которая разрабатывает ПО для анализа и оптимизации солнечных электростанций. Ее ПО включают в себя инструменты для прогнозирования производства электроэнергии, оценки эффективности установленных солнечных панелей и оптимизации их размещения [13].

Все описанные выше существующие ПО представляют собой своеобразные калькуляторы прогноза выработки солнечной электростанции на основе теоретической инсоляции и температуры и не ориентированы на краткосрочное прогнозирование на основе фактической инсоляции и температуры, поэтому не могут обеспечить реализацию поставленной цели настоящего исследования. Таким образом, проведенный анализ существующего ПО показал:

- отсутствие доступного программного обеспечения для эффективного прогноза выработки солнечной электростанции;

- целесообразность и актуальность создания интеллектуальной технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции.

В настоящем исследовании разработана, апробирована и реализована как программа для

ЭВМ на основе модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания (МННС) интеллектуальная система непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции (ИСПВЭСЭ), подробно описанная в работах авторов [14, 15]. В нотации UML CASE-средством Microsoft Visio созданы диаграмма классов и блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ. Гибкость и легкую модифицируемость программы для ЭВМ, простоту добавления новых модулей обеспечивает блочно-модульная архитектура.

Апробация способствующей импортозамещению программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для построения макетов рынка «сутки вперед». База данных SCADA солнечной электростанции легко интегрируется ИСПВЭСЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Интеллектуальные технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции составляют виртуальную цифровую реальность, обеспечивающую безопасность и эффективность солнечной энергетики, включая ее интеграцию в электрические сети. Описанные в работе авторов [14, 15] результаты ИСПВЭСЭ отражают:

- ее робастность в условиях неопределенности и уменьшение среднеквадратичной ошибки ее прогноза в среднем в три и шесть раз в сравнении с рекуррентными нейросетями и стандартной моделью ARMA;
- целесообразность проектирования и реализации как программы для ЭВМ ИСПВЭСЭ, описанной в работе авторов [14].

Блочно-модульная архитектура разработанной для ЭВМ программы обеспечивает ее гибкость, легкую модификацию имеющихся и добавление вновь разработанных модулей, реализующих вспомогательные методы, например интеграцию с аппаратным обеспечением инвертора и/или бесконтактную верификацию пользователя (описание которых выходит за рамки настоящей статьи). Ядром способствующей импортозамещению программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, является модуль МННС. Таким образом, модуль солнечной электростанции можно заменить другим модулем, реализующим, например, ветровую электростанцию. Реализованная CASE-средством Microsoft Visio блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, состоит из трех модулей (рис. 1). База данных SCADA солнечной электростанции легко интегрируется ИСПВЭСЭ на основе модуля управления данными.

Созданная в нотации UML средствами Microsoft Visio диаграмма классов указанной программы для ЭВМ состоит из 6 классов, имеющих многоуровневую иерархию (рис. 2).

Базовым классом для ИСПВЭСЭ является МННС с методами структурно-параметрического синтеза, диагностического функционирования и масштабированной коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средствами программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, сгенерированы макеты рынка «сутки вперед» на основе трехлетнего архива табличных данных фактической вырабатываемой электроэнергии Абаканской солнечной электростанции I_h^t и вектора:

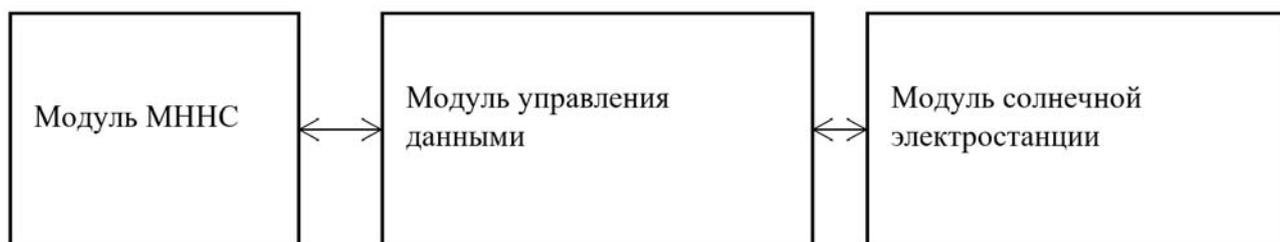


Рис. 1. Блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

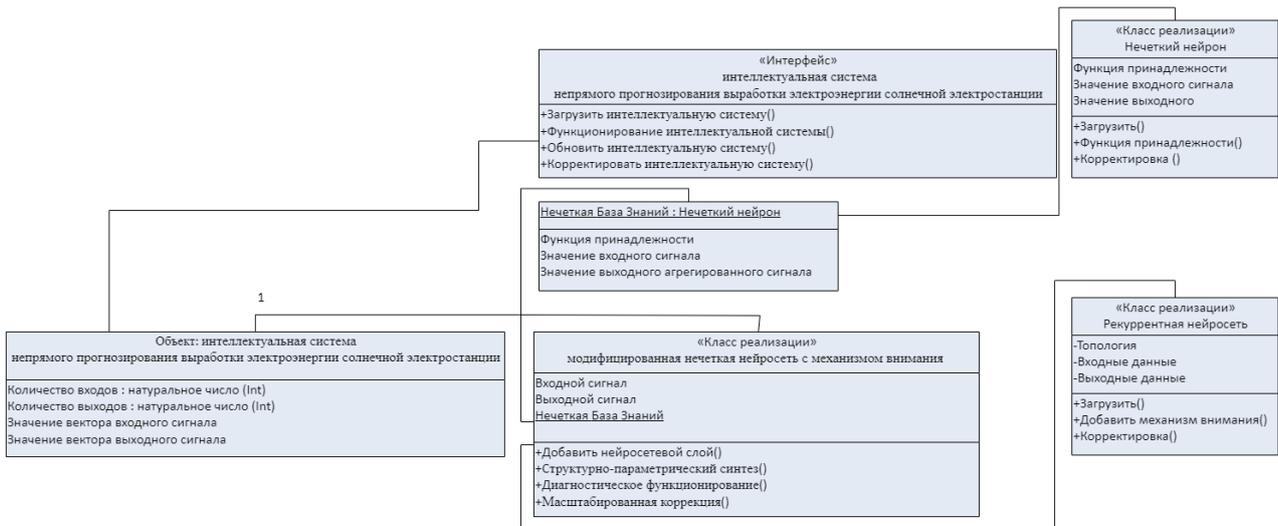


Рис. 2. UML-диаграмма классов ИСПВЭСЭ

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

$$X_h^t = (C_h^{t-2-m}, I_h^{t-2-m}, I_h^{t-m}, T_h^{t-m}, P_h^{t-m}, W_h^{t-m}, d_h^{t-m}), \quad (1)$$

где C_h^{t-2-m} – индекс ясного неба, I_h^t – облачность (%),

T_h^{t-m} – температура воздуха,

P_h^{t-m} – атмосферное давление,

W_h^{t-m} и d_h^{t-m} – скорость и направление ветра

соответственно,

T_h^{t-m} – температура воздуха,

m – размер окна прогнозирования, $m = 0..14, 361..369, h \in \{5, \dots, 23\}, t \in \{370, \dots, 1095\}$.

Кривые фактической и прогнозируемой средствами разработанной для ЭВМ программы

выработки Абаканской солнечной электростанции (рис. 3) отражают приемлемую точность (таблица) сгенерированных разработанной программой для ЭВМ макетов рынка «сутки вперед» для последнего месяца архивных табличных данных (1).

Эффективность сгенерированных макетов рынка «сутки вперед» для последнего месяца архива данных (1) оценена как среднеквадратичная ошибка (RMSE) и абсолютная ошибка, диктуемая рынком «сутки вперед» (AER): допустимая погрешность макета рынка «сутки вперед» солнечной электростанции не должна превышать 5% от ее мощности.

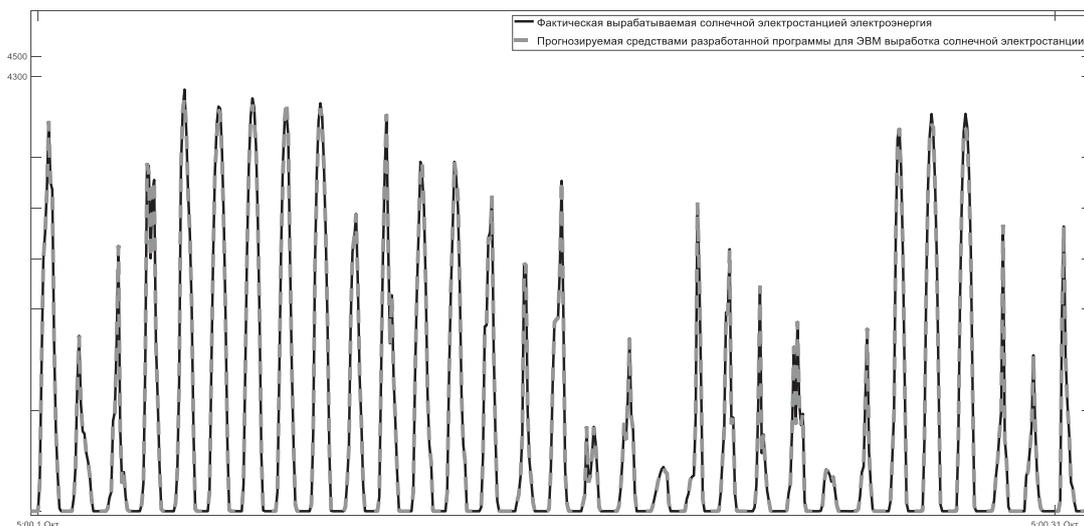


Рис. 3. Фактическая и прогнозируемая средствами разработанной для ЭВМ программы выработка солнечной электростанции

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Эффективность сгенерированных макетов рынка «сутки вперед»

Ошибка	МННС
AER	0
RMSE	16,7

Примечание: МННС – модифицированная нечеткая нейросеть с механизмом внимания; AER – абсолютная ошибка, диктуемая рынком «сутки вперед»; RMSE – среднеквадратичная ошибка. Составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

RMSE вычислялась согласно выражению:

$$RSME = \frac{1}{31} \sum_{t=1064}^{1095} \left(\sum_{h=5}^{23} (I_h^t - P_h^t)^2 \right), \quad (2)$$

где P_h^t – прогнозируемая величина выработки солнечной электростанции, I_h^t – фактическая величина выработки солнечной электростанции.

AER вычислялась согласно выражению:

$$AER = \sum_{t=1064}^{1095} \left(\sum_{h=5}^{23} \left[\sum_{\text{если } |I_h^t - P_h^t| > 260} (|I_h^t - P_h^t| - 260) \right] \right). \quad (3)$$

Анализ качества непрямого прогноза выработки солнечной электростанции, отраженный в таблице, показывает целесообразность применения программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ для построения макетов рынка «сутки вперед».

Список источников

1. Большие вызовы и приоритеты научно-технологического развития. URL: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> (дата обращения: 20.01.2024).
2. Значение солнечной инсоляции в г. Абакан (Республика Хакасия). URL: <https://www.betaenergy.ru/in-solation/abakan/> (дата обращения: 20.01.2024).
3. Engel E., Engel N. A review on machine learning applications for solar plants. *Sensors (Basel)*. 2022;22(23):9060.
4. Liu L., Liu D., Sun Q. et al. Forecasting power output of photovoltaic system using a BP network method. *Energy Procedia*. 2017;142:80–786.
5. SolarSoft. URL: <https://www.lmsal.com/solarsoft/> (дата обращения: 20.01.2024).
6. Solar Array Simulator DC Power Supply. URL: <https://www.chromausa.com/product/solar-array-simulator/> (дата обращения: 20.01.2024).
7. NREL. System Advisor Model (SAM). URL: <https://sam.nrel.gov> (дата обращения: 20.01.2024).
8. Helioscope. URL: <https://helioscope.aurorasolar.com> (дата обращения: 20.01.2024).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании разработана, апробирована и реализована как программа для ЭВМ ИСПВЭСЭ на основе МННС. Разработаны UML-диаграмма классов и блочно-модульная архитектура программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, обеспечивающая гибкость, легкую модификацию имеющихся и добавление вновь разработанных модулей реализованной для ЭВМ программы.

Апробация способствующей импортозамещению программы для ЭВМ, реализующей ИСПВЭСЭ, отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для построения макетов рынка «сутки вперед».

References

1. Bolshie vyzovy i priorityety nauchno-tekhnologicheskogo razvitiia. URL: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> (accessed: 20.01.2024). (In Russian).
2. Znachenie solnechnoi insoliatsii v g. Abakan (Respublika Khakasiia). URL: <https://www.betaenergy.ru/in-solation/abakan/> (accessed: 20.01.2024). (In Russian).
3. Engel E., Engel N. A review on machine learning applications for solar plants. *Sensors (Basel)*. 2022;22(23):9060.
4. Liu L., Liu D., Sun Q. et al. Forecasting power output of photovoltaic system using a BP network method. *Energy Procedia*. 2017;142:80–786.
5. SolarSoft. URL: <https://www.lmsal.com/solarsoft/> (accessed: 20.01.2024).
6. Solar Array Simulator DC Power Supply. URL: <https://www.chromausa.com/product/solar-array-simulator/> (дата обращения: 20.01.2024).
7. NREL. System Advisor Model (SAM). URL: <https://sam.nrel.gov> (accessed: 20.01.2024).
8. Helioscope. URL: <https://helioscope.aurorasolar.com> (accessed: 20.01.2024).

9. Aurora. URL: <https://aurorasolar.com> (дата обращения: 20.01.2024).
10. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en> (дата обращения: 20.01.2024).
11. SolarServer. PV forecast Europe. URL: <https://www.solarserver.com/service/solar-photovoltaic-power-forecast-for-worldwide-locations/pv-forecast-europe.html> (дата обращения: 20.01.2024).
12. PVsyst. Download. URL: <http://www.pvsyst.com/en/software/download> (дата обращения: 20.01.2024).
13. Clean Power Research. URL: <https://www.cleanpower.com> (дата обращения: 20.01.2024).
14. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Система непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии массивом солнечных панелей на основе модифицированной нечеткой нейросети // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 6. С. 744–758.
15. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная система прогнозирования температуры на основе модифицированной нечеткой нейросети // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 76–81.
9. Aurora. URL: <https://aurorasolar.com> (accessed: 20.01.2024).
10. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en> (accessed: 20.01.2024).
11. SolarServer. PV forecast Europe. URL: <https://www.solarserver.com/service/solar-photovoltaic-power-forecast-for-worldwide-locations/pv-forecast-europe.html> (accessed: 20.01.2024).
12. PVsyst. Download. URL: <http://www.pvsyst.com/en/software/download> (accessed: 20.01.2024).
13. Clean Power Research. URL: <https://www.cleanpower.com> (accessed: 20.01.2024).
14. Engel E. A., Engel N. E. An indirect forecasting system of the power from a solar panel array based on modified fuzzy neural network. *J Sib Fed Univ Eng Technol.* 2023;16(6):744–758. (In Russian).
15. Engel E. A., Engel N. E. An intelligent system for temperature forecasting based on a modified fuzzy neural network. *Proceedings in Cybernetics.* 2023;22(3):76–81. (In Russian).

Информация об авторах

Е. А. Энгель – кандидат технических наук, доцент.
Н. Е. Энгель – бакалавр.

Information about the authors

E. A. Engel – Candidate of Sciences (Engineering),
Docent.
N. E. Engel – Bachelor's Degree Student.