

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.243

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-37-47

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ P&O И ANFIS ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Петров Т.И., Али Н.К., Петрова А.Р., Гибадуллин Р.Р.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
tobac15@mail.ru

Резюме: Фотоэлектрическая энергия зависит от преобразования солнечного света в электричество. В последние годы цена на оборудование для солнечной электростанции резко снизилась, что привело к увеличению генерации фотоэлектрической энергии в последние годы. И повышение эффективности работы панелей является самой большой проблемой в солнечной энергетике. **ЦЕЛЬ.** Разработать систему для максимизации выходной мощности фотоэлектрических панелей при изменении солнечного излучения и температурных условий. **МЕТОДЫ.** В этом исследовании сравниваются два метода, которые позволяют повысить эффективность работы фотоэлектрических модулей, за счет определения точки максимальной мощности, ANFIS и P&O. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В этой работе объясняется пошаговый процесс, моделирование и анализ возмущений и наблюдений с помощью ANFIS и P&O с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink. Метод P&O лучше работает в стабильных условиях, однако его эффективность резко падает при резких изменениях освещения. С другой стороны, ANFIS более устойчива к изменениям и способна адаптироваться к новым условиям, что делает ее более универсальным инструментом. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Таким образом, при выборе подхода к отслеживанию точки максимальной мощности стоит учитывать множество факторов, включая условия эксплуатации, доступные ресурсы и цели. Метод P&O является отличным решением для менее требовательных условий и простых установок, в то время как ANFIS предоставляет решения для более сложных и динамичных приложений. Главное, что стоит подчеркнуть, это необходимость глубокой оценки ситуации и выбора наиболее подходящего метода для конкретных условий. Определение правильной стратегии может значительно улучшить работу фотоэлектрических модулей и повысить их общую эффективность в рамках электротехнических комплексов.

Ключевые слова: методы для определения точки максимальной мощности; фотоэлектрическая энергия; математическое моделирование; солнечные панели.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Для цитирования: Петров Т.И., Али Н.К., Петрова А.Р., Гибадуллин Р.Р. Сравнение методов P&O и ANFIS для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических модулей в составе электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 37-47. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-37-47.

COMPARISON OF P&O AND ANFIS METHODS FOR MONITORING THE MAXIMUM POWER POINT OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN ELECTRICAL COMPLEXES

Petrov T.I., Ali N.K., Petrova A.R., Gibadullin R.R.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
tobac15@mail.ru

Abstract: Photovoltaic energy depends on the conversion of sunlight into electricity. In recent years, the price of solar power plant equipment has dropped sharply, which has led to the increase of photovoltaic power generation in recent years. There is a trend of decreasing cost of solar panels and power plant equipment, and this has caused the increase of electricity generated from PV modules. **OBJECTIVE.** To develop a system to maximize the power output of PV panels under changing solar irradiance and temperature conditions. **METHODS.** This study compares two methods that can improve the working efficiency of PV modules by determining the maximum power point, ANFIS and P&O. **RESULTS.** This paper explains the step-by-step process, simulation and disturbance and observation analysis by ANFIS and P&O using MATLAB/Simulink software. The P&O method works better in stable conditions, but its effectiveness drops sharply with sudden changes in lighting. On the other hand, ANFIS is more resistant to changes and is able to adapt to new conditions, which makes it a more versatile tool. **CONCLUSION.** Therefore, when choosing an approach to MPP tracking, it is worth considering many factors, including operating conditions, available resources, and goals. The P&O method is an excellent solution for less demanding conditions and simple installations, while ANFIS provides solutions for more complex and dynamic applications. The main thing to emphasize is the need for a thorough assessment of the situation and the selection of the most suitable method for specific conditions. Determining the right strategy can significantly improve the performance of PV modules and increase their overall efficiency within electrical complexes.

Keywords: methods for determining the maximum power point; photovoltaic energy; mathematical modeling; solar panels.

Acknowledgments: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan."

For citation: Petrov T.I., Ali N.K., Petrova A.R., Gibadullin R.R. Comparison of P&O and ANFIS methods for monitoring the maximum power point of photovoltaic modules in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (1): 37-47. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-37-47.

Введение (Introduction)

В последние годы наблюдается растущий интерес к солнечной энергетике. Эффективное использование солнечных фотоэлектрических модулей зависит не только от качества самих панелей, но и от технологий, применяемых для их управления.

Алгоритмы МРРТ предназначены для оптимизации работы фотоэлектрических модулей, позволяя им генерировать максимальное количество энергии в разных условиях. Основная задача этих алгоритмов заключается в отслеживании максимальной выходной мощности модуля, которая зависит от различных факторов, таких как солнечное излучение, температура, угол наклона панелей и другие [1-5].

Важно отметить, что работа алгоритмов МРРТ в значительной мере влияет на общую эффективность фотогальванических систем. Правильный выбор алгоритма позволяет минимизировать потери при преобразовании солнечной энергии в электрическую [6, 7].

Особое внимание уделяется алгоритмам отслеживания точки максимальной мощности (МРРТ), среди которых метод Perturb and Observe (P&O) и адаптивная нечёткая инференс-система (ANFIS) занимают важные места [8-10]. В данной статье мы рассмотрим

архитектуру и работу этих алгоритмов, их сравнительные характеристики, а также процесс моделирования в MATLAB.

Метод Р&О основывается на периодическом измерении возмущения выходной мощности модуля, что позволяет отслеживать изменения в условиях освещения и температуры. При каждом изменении состояния система сравнивает текущую мощность с предыдущей, определяя, нужно ли увеличить или уменьшить напряжение для достижения максимальной генерации энергии. Этот метод прост в реализации, но может давать колебания около точки максимальной мощности, особенно в условиях быстро меняющейся солнечной активности [11].

В свою очередь, ANFIS использует комбинацию нейронных сетей и нечеткой логики для более точного прогнозирования и отслеживания МРРТ. Система обучается на основе исторических данных, что позволяет ей адаптироваться к изменениям во внешней среде и оптимизировать процесс максимально эффективно. Этот подход обеспечивает значительное улучшение в стабильности и скорости регулирования, особенно в условиях изменчивого освещения [12].

Научной значимостью предлагаемой статьи является изучение тенденции в методах отслеживания точки максимальной мощности, моделирование двух основных методов. Практическая значимость заключается в сравнении методов, с выбором наиболее эффективного.

Отличие представленной работы от результатов исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, заключается в реализации работы двух методов в программе Matlab (Simulink), с описанием алгоритмов работы.

Материалы и методы (Materials and methods)

Точка максимальной мощности – это значение напряжения и тока, при которых солнечные панели выдают максимальную энергию. Эта точка зависит от различных факторов, включая уровень солнечного освещения, температуру и характеристики самой панели. Оптимизация работы панелей для достижения максимальной мощности требует неустанного мониторинга условий окружающей среды и быстрого реагирования на изменения.

На рисунке 1 представлена спецификация рассматриваемых фотоэлектрических панелей и модулей.

Parameter	Value
Maximum power (W)	305.226
Voltage at maximum power (V_{mp})	54.7 V
Current at maximum power (I_{mp})	5.58 A
Open circuit voltage (V_{oc})	64.2 V
Short circuit current (I_{sc})	5.96 A
Total no.of cells in series (N_s)	5
Total no.of cells in parallel (N_p)	66
Temperature coefficient of V_{oc} (K_v)	-272.7 mV/°C
Temperature coefficient of I_{sc} (K_i)	61.745 mA/°C
Diode saturation current (I_0)	6.3076×10^{-12} A
Parallel resistance (R_p)	393.2054 Ω .
Series resistance (R_s)	0.37428 Ω
Maximum power (kW) (PV array)	100 KW
Voltage at maximum power (V_{mp}) (PV array)	273.5 V
Current at maximum power (I_{mp}) (PV array)	368.28 A
Open circuit voltage (V_{oc}) (PV array)	321 V
Short circuit current (I_{sc}) (PV array)	399.432 A

Рис. 1. Спецификация фотоэлектрических панелей и модулей

Fig. 1. Specification of photovoltaic panels and modules

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Алгоритм возмущения и наблюдения (Р&О) – это процедура, в которой переменная изменяется (возмущается), а влияние изменения на другую переменную отслеживается (наблюдается) [13]. Чтобы определить, увеличивается или уменьшается мощность, изменяется напряжение фотоэлектрического модуля.

Один из основных факторов, способствующих популярности метода Р&О, заключается в его простоте и относительной дешевизне. Он не требует сложного оборудования и алгоритмов, что делает его доступным для большинства электротехнических комплексов. Кроме того, метод Р&О способен быстро реагировать на изменения условий окружающей среды, что позволяет оперативно находить точку максимальной мощности [14]. Именно этот аспект делает его подходящим для использования в реальных условиях.

Несмотря на свои преимущества, метод Р&О имеет и недостатки. Наиболее значительным из них является его склонность к «плаванию» в точке максимальной мощности, особенно в условиях переменных уровней солнечного света. Когда облака закрывают солнце или возникают другие изменения в условиях, система может не успеть адаптироваться, что может привести к потерям в выходной мощности [15]. Также стоит отметить, что в условиях быстро меняющихся параметров, метод Р&О может приводить к неэффективному использованию ресурсов, так как он требует постоянного изменения рабочего режима для нахождения максимума. Алгоритм работы представлен в виде блок-схемы (рис. 2).

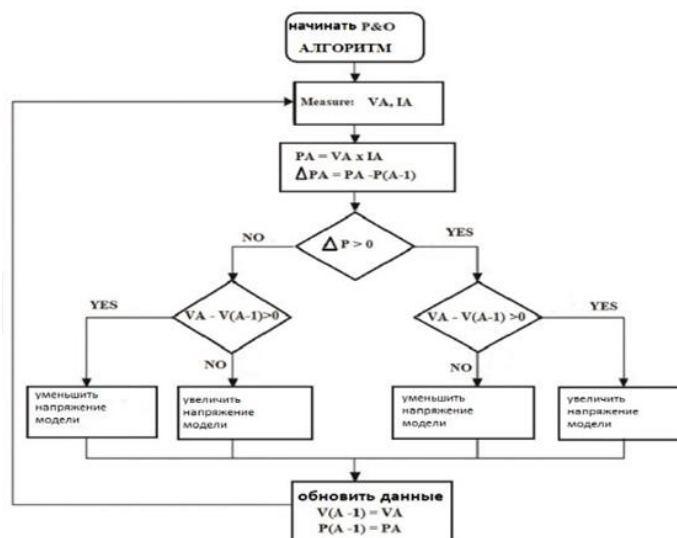


Рис. 2. Блок-схема алгоритма Р&О

Fig. 2. P&O Algorithm Flowchart

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

ANFIS – это адаптивная система нейро-нечеткого вывода, которая использует 5-слойную нейронную сеть MLP для уточнения нечетких правил, уже установленных экспертами-людьми, и способна скорректировать перекрытие между различными нечеткими подмножествами для описания поведения ввода-вывода сложной системы с использованием базы данных для обучения [16-18]. Алгоритм сочетает в себе преимущества двух машинных методов обучения, методов искусственного интеллекта (Fuzzy Логика и нейронная сеть). В этой системе нечеткая логика преобразует входные данные в желаемый результат с помощью высокоэффективной взаимосвязанной нейронной сети, взвешенная для отображения цифрового входа на выход. Как показано на рисунке 3, эта сеть, которая представляет собой решение системы нечеткого уравнения Такаги-Сугено Канга, системы вывода (FIS) и искусственная нейронная сеть, которая имеет структуру, состоящую из пяти слоев. Квадратные узлы представляют собой адаптивные части, а круговые узлы представляют собой неадаптивные секции. Параметры адаптивных узлов будут изменены в ходе процесс обучения ANFIS. Обучение осуществляется за счет гибридного метода, основанного на принципе обратного распространения ошибки и метода наименьших квадратов. Роль обучения заключается в настройке параметров этой системы нечеткого вывода, эта модель дает очень хорошие результаты аппроксимации для нелинейных функций.

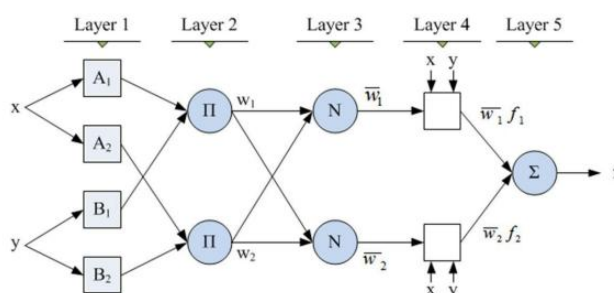


Рис. 3. Структура работы нейронной сети ANFIS

Fig. 3. The structure of the ANFIS neural network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Впоследствии гибридный алгоритм обучения, который сочетает в себе алгоритм обучения обратного распространения ошибки и метод наименьших квадратов, используется для определения оптимальных значений параметров этих функций принадлежности и последовательных параметров. Эти последовательные параметры используются для определения выходных данных сети ANFIS. Используется экспериментальная база данных, собранная на солнечной фотоэлектрической станции.

Для моделирования в рамках PSC данные обучения получаются путем моделирования фотоэлектрического модуля и измерения параметров. Система обучена в течение 10 эпох, и полученная ошибка обучения равна $1,7 \cdot 10^{-7}$. На рисунке 4 показана блок-схема реализации MPPT на основе ANFIS, на рисунках 5-6 – модель в Matlab (Simulink).

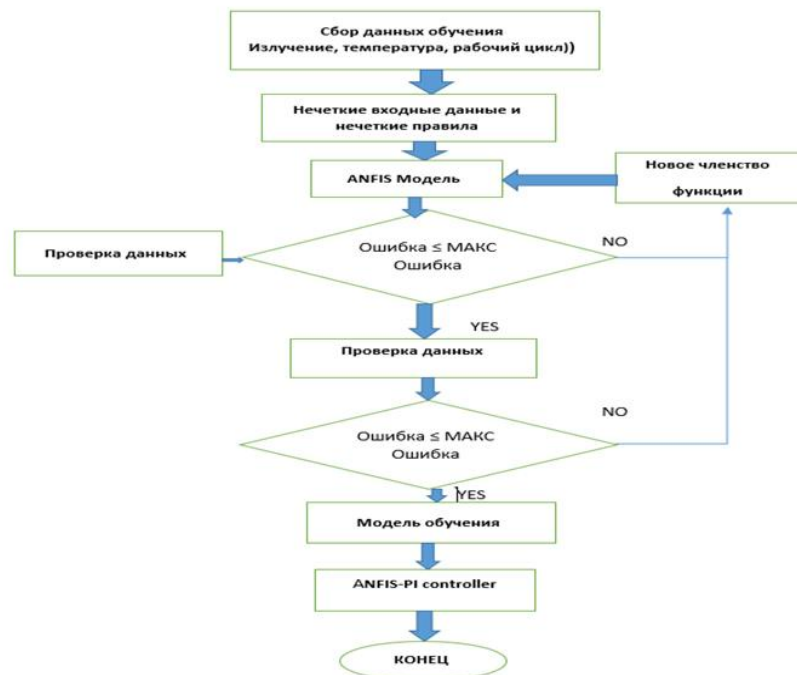


Рис. 4. Блок-схема алгоритма ANFIS

Fig. 4. ANFIS Algorithm Flowchart

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

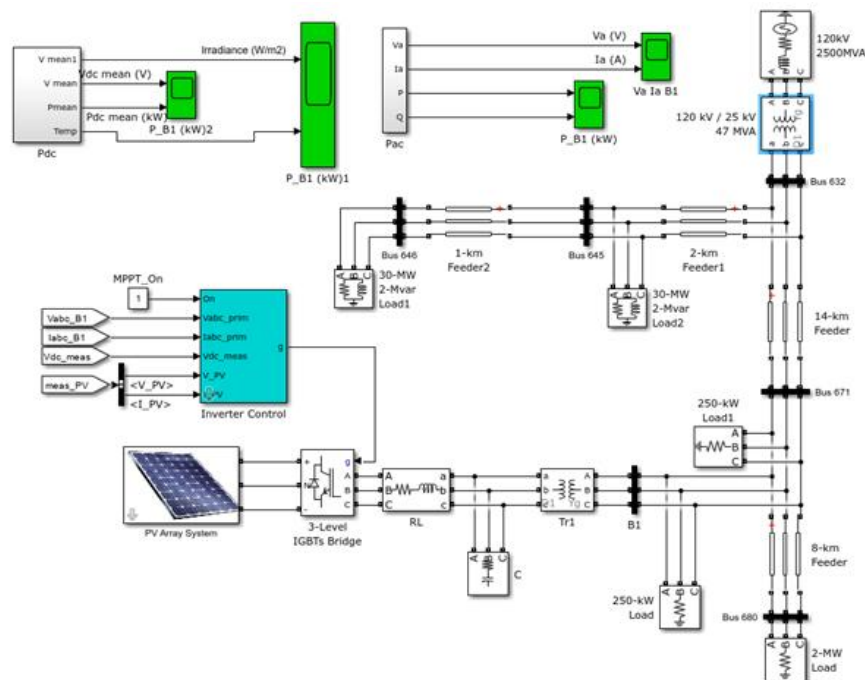


Рис. 5. Модель системы, разработанная в Simulink

Fig. 5. System model developed in Simulink

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

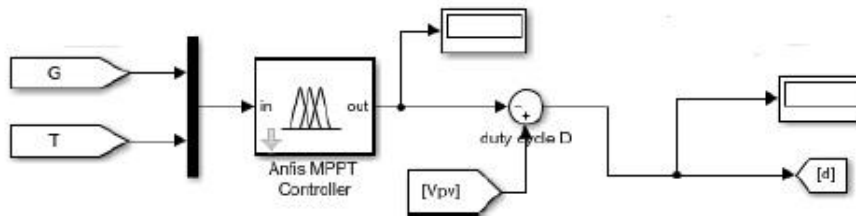


Рис. 6. Модель системы блока ANFIS, Fig. 6. System model ANFIS developed in Simulink разработанная в Simulink

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение результатов (Discussions and Results)

MATLAB предоставляет мощную платформу для моделирования систем МРРТ. Перед началом моделирования необходимо определить основные параметры модуля, такие как выходное напряжение, ток и условия окружающей среды. Важно учитывать, что все входные значения должны быть актуальными для реальных условий.

Для реализации алгоритма Р&О в MATLAB необходимо создать цикл, который будет периодически вычислять и обновлять выходные параметры. Программный код должен включать:

- Инициализацию переменных для хранения данных.
- Цикл, в котором осуществляется периодическая выборка напряжения и тока.
- Вычисление мощности.
- Логика возмущения напряжения в зависимости от изменения мощности.

Пример кода на MATLAB:

```
% Инициализация переменных
V = 0; % Напряжение
I = 0; % Ток
P_old = 0; % Старая мощность
dp = 0.1; % Изменение напряжения
while true
    % Измерение напряжения и тока
    V = measureVoltage(); % Замеры
    I = measureCurrent(); % Замеры

    P = V * I; % Мощность
    if P > P_old
        V = V + dp; % Увеличение напряжения
    else
        V = V - dp; % Уменьшение напряжения
    end
    P_old = P; % Сохранение старой мощности
end
```

Для реализации ANFIS в MATLAB необходимо предварительно обучить модель, используя набор данных, содержащий различные сценарии работы модуля. В MATLAB существует функционал для создания и обучения ANFIS-моделей.

Примерный алгоритм выглядит следующим образом:

– Подготовка датасета из чисел, отражающих параметры работы модуля в различных условиях.

- Создание нечёткой системы с подмножествами для всех входных переменных.
- Обучение модели на предоставленном датасете.

Пример кода на MATLAB:

```
% Подготовка данных
data = load('dataset.mat'); % Загрузка данных
inputs = data(:, 1:2); % Температура и освещенность
outputs = data(:, 3); % Мощность
% Создание и обучение ANFIS
fis = genfis1([inputs, outputs], 10, 'gbellmf', 'constant');
anfisModel = anfis([inputs, outputs], fis).
```

Модель MATLAB/Simulink для алгоритма ANFIS и Р&О была спроектирована, разработана и проверена в различных условиях.

На рисунках 7-8 представлены результаты моделирования для обоих методов.

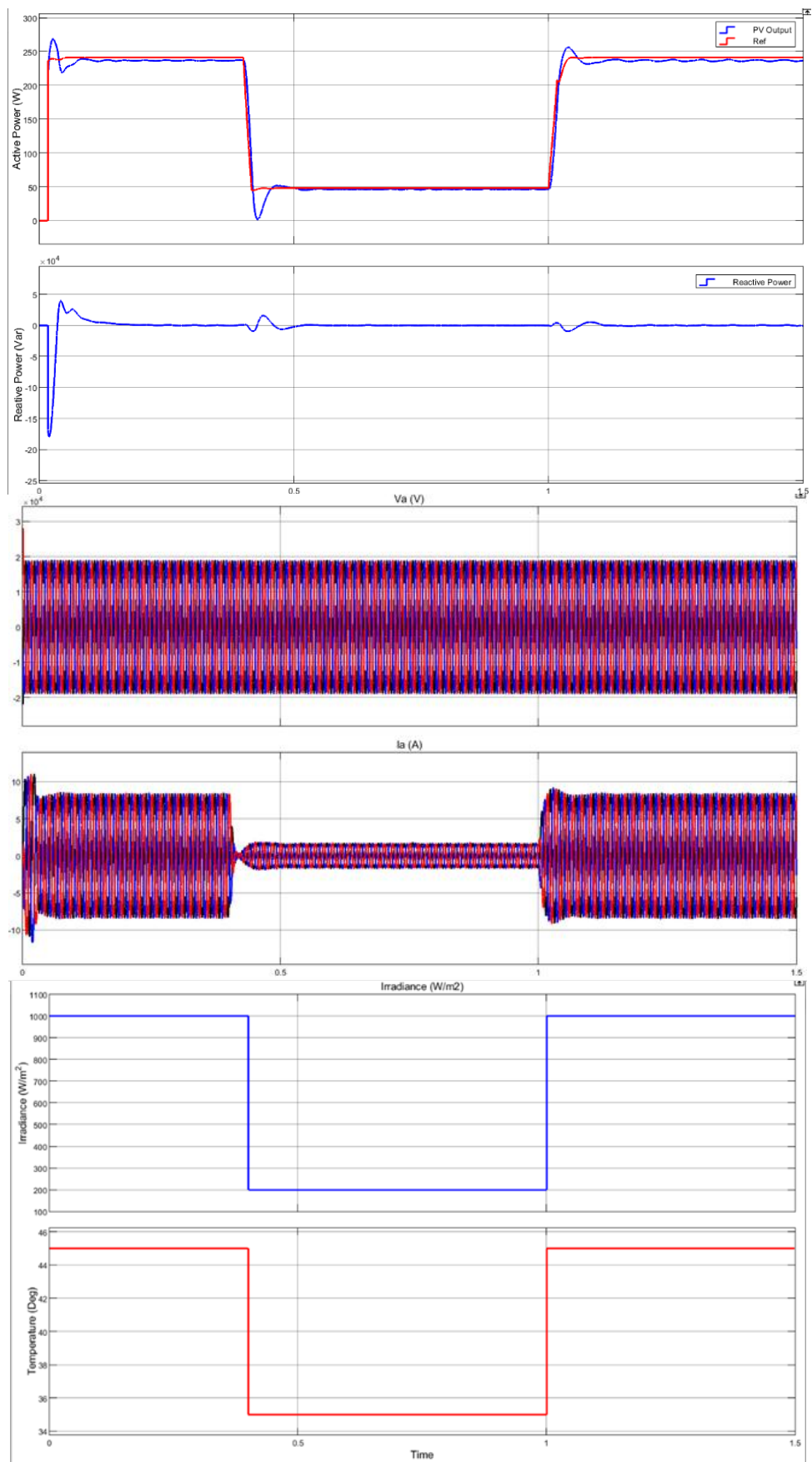


Рис. 7. Графики параметров фотоэлектрической батареи (P&O) Fig. 7. Photovoltaic array parameter graphs (P&O)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

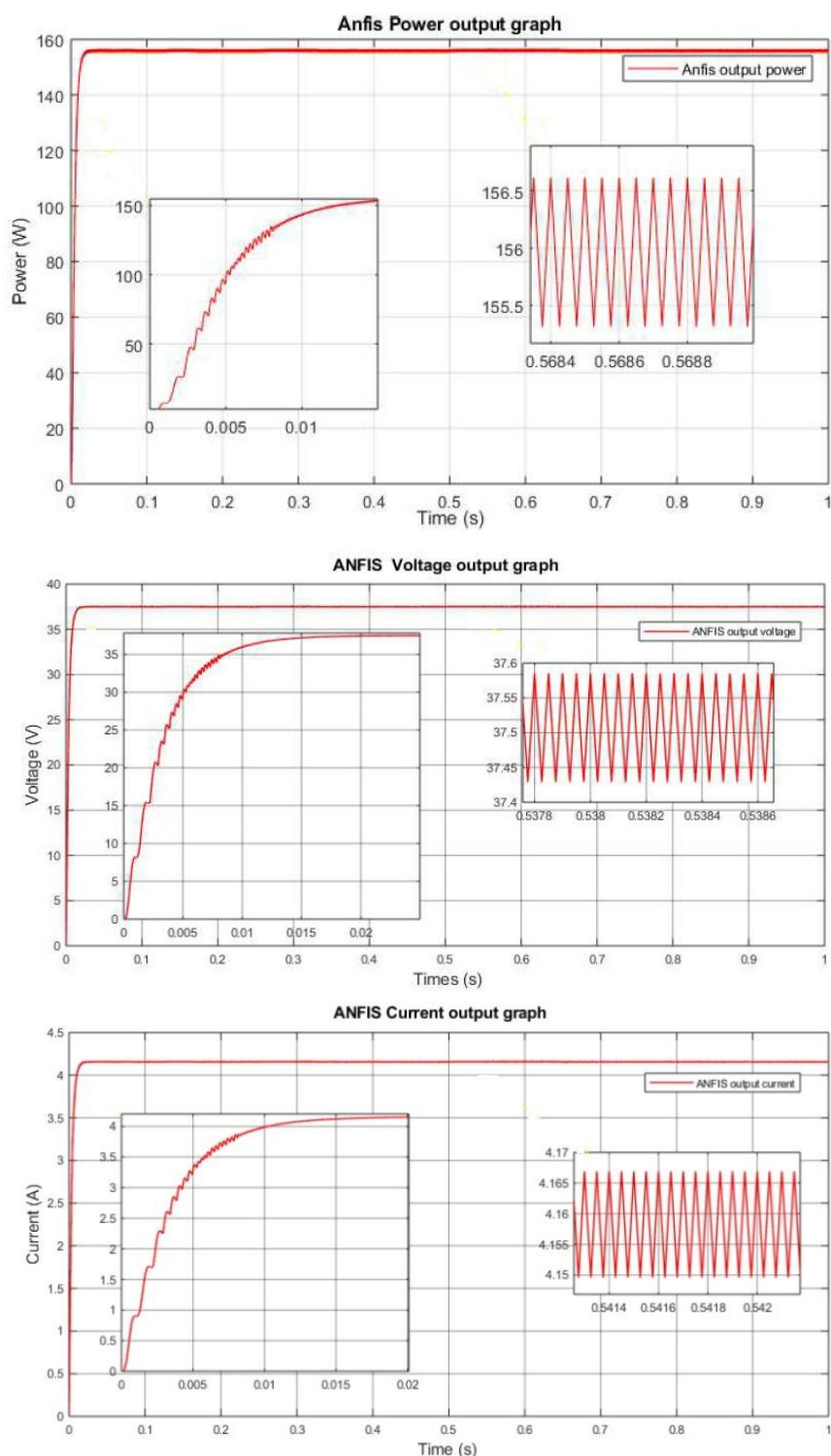


Рис. 8. Графики параметров фотоэлектрической батареи (ANFIS) *Fig. 8. Photovoltaic array parameter graphs (ANFIS)*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Результаты, представленные в этой статье, показывают, что метод ANFIS очень быстр и точен в поиске и отслеживании MPP в случае быстрого изменения солнечного излучения. Кроме того, этот метод может стабильно извлекать точку максимальной мощности при медленном изменении солнечного излучения. Напротив, когда излучение быстро меняется за короткое время, метод P&O не может эффективно отслеживать MPP. Кроме того, этот метод имеет высокие колебания вокруг MPP при медленном изменении солнечного излучения, что приводит к высоким потерям мощности в долгосрочной перспективе.

В настоящей работе представлены адаптивные нейро-нечеткие системы вывода, основанные на трекерах максимальной мощности для фотоэлектрической системы.

Представленный алгоритм прост и дает выгодное решение при изменяющихся условиях окружающей среды. Результаты моделирования показали, что ANFIS может отслеживать максимальную мощность, имея меньшее время установления при различных сценариях затенения. Сравнительный анализ ANFIS и P&O установил превосходство алгоритма ANFIS.

Выводы (Conclusions)

Исследование содержит результаты применения MPPT с целью повышения мощности батареи 17 кВт. Моделирование производилось для стандартных условий работы фотоэлектрических модулей. Сравнивались 2 метода P&O, ANFIS, рассмотрены принципы работы, алгоритмы. Для моделирования использовалось ПО Matlab, подпрограмма Simulink, где при помощи готовых модулей были разработаны модели фотоэлектрической станции, с использованием методов MPPT.

Работа алгоритмов P&O и ANFIS для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических модулей демонстрирует различные подходы к повышению эффективности солнечных систем. Каждому алгоритму присущи свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от специфики задачи и условий эксплуатации.

Для P&O было получено, что данный метод эффективен при работе в значениях, близких к MPP, хоть и наблюдаются незначительные колебания. Также стоит отметить, что наилучший результат работы метода достигался не при динамических, а статических условиях. Результаты моделирования работы ANFIS показывают, что метод более стабилен при динамических условиях, определяет MPP точнее и быстрее, и имеет меньшие колебания. Таким образом, можно сказать, что алгоритм ANFIS более перспективен для повышения эффективности работы фотоэлектрических модулей.

Таким образом, понимание работы алгоритмов MPPT и их внедрение в практику являются ключевыми для достижения высоких показателей эффективности в области солнечной энергетики.

Литература

1. Liu F., Duan S., Liu B., and Kang Y. A variable step size INC MPPT method for PV systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, Jul. 2008.
2. Tyagi V. V., Rahim N. A. A., Rahim N. A., and Selvaraj J. A. L. Progress in solar PV technology: research and achievement // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, pp. 443–461, 2013.
3. Mehmet Y. and Muhammedfatih C.. PSO Training Neural Network MPPT With CUK Converter Topology for Stand-Alone PV Systems Under Varying Load and Climatic Conditions // Türk Doğa Ve Fen Dergisi, vol. 13, no. 1, 2024, pp. 88-97.
4. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021; 16(4), 1879-1889.
5. Padmavathi N, Chilambuchelvan A, Shanker NR. Maximum power point tracking during partial shading effect in PV system using machine learning regression controller // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021; 16, 737-748.
6. Basha CH, Murali M. A new design of transformerless, non-isolated, high step-up DC-DC converter with hybrid fuzzy logic MPPT controller // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2022; 50(1), 272-297.
7. Гибадуллин, Р. Ф. Организация защищенной передачи данных в сенсорной сети на базе микроконтроллеров AVR // Кибернетика и программирование. 2018. № 6. С. 80-86.
8. Нуриев М. Г., Гизатуллин Р.М., Мухамадиев А.А. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 10.
9. Петров Т.И., Сафин А.Р., Низамиев М.Ф., Басенко В.Р. Применение генетического алгоритма при разработке программного обеспечения для перебора материалов при оптимизации синхронных двигателей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 2(54). – С. 96-105.
10. Safin A., Kopylov A., Gibadullin R., Petrov T., Khusnutdinov R., Fedorov O. Thermal Model of a Linear Electric Machine // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428.
11. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., Петров Т.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 38-48.

12. Tabachnikova T. V., Gracheva E. I., Naumov O. V., et al. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Almet'yevsk, Republic of Tatarstan, 2020. P. 012014.
13. Gracheva E., Toshkhodzhaeva M., Rahimov O., Dadabaev S., et. al. Modeling the Reliability of High-Voltage Power Transmission Lines Taking into Account the Influence of the Parameters of a Sharply Continental Climate // International Journal of Technology, 2020, vol. 11, iss. 8, 2020, P. 1557-1569.
14. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2021; 16(4), 1879-1889.
15. Yılmaz M, Kaleli A, Çorapsız MF. Machine learning based dynamic super twisting sliding mode controller for increase speed and accuracy of MPPT using real-time data under PSCs // Renewable Energy. 2023; 219, 119470
16. Aygül K, Cikan M, Demirdelen T, Tumay M. Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2023; 45(3), 8337-8355.
17. Bouarroudj N, Benlahbib B, Houam Y, Sedraoui M, Batlle VF, Abdelkrim T, et al. Fuzzy based incremental conductance algorithm stabilized by an optimal integrator for a photovoltaic system under varying operating conditions // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2021; 1-26.
18. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities // Journal of Mining Institute. 2024. p. EDN UIZSOQ.

Авторы публикации

Петров Тимур Игоревич – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

Али Нисрин Карим – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

Петрова Анастасия Руслановна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

Гибадуллин Рамил Рифатович – заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия.

References

1. Liu F, Duan S, Liu B, and Kang Y. A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008; 55(7):2622–2628.
2. Tyagi VV, Rahim NAA, Rahim NA, and Selvaraj JAL. Progress in solar PV technology: research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 20:443– 461.
3. Yılmaz M, Corapsiz M. PSO Training Neural Network MPPT with CUK Converter Topology for Stand-Alone PV Systems Under Varying Load and Climatic Conditions. *TJNS*. 2024; 13(1):88–97.
4. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021; 16(4):1879-1889.
5. Padmavathi N, Chilambuchelvan A, Shanker NR. Maximum power point tracking during partial shading effect in PV system using machine learning regression controller. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021; 16, 737-748.
6. Basha CH, Murali M. A new design of transformerless, non-isolated, high step-up DC-DC converter with hybrid fuzzy logic MPPT controller. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 2022; 50(1), 272-297.
7. Gibadullin RF. Organization of secure data transmission in a sensor network based on AVR microcontrollers. *Cybernetics and Programming*. 2018;6:80-86.

8. Nuriev MG, Gizatullin RM, Mukhamadiev AA. Study of the noise immunity of computer technology under electromagnetic influences through the metal structure of a building based on physical modeling. *Journal of Radio Electronics*. 2019;4:10.
9. Petrov TI, Safin AR, Nizamiev MF, Basenko VR. Application of genetic algorithm in development of software for material selection in optimization of synchronous motors. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2022;14,2(54):96-105.
10. Safin A., Kopylov A., Gibadullin R., Petrov T., Khusnutdinov R., Fedorov O. Thermal Model of a Linear Electric Machine. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia*. 2019:8 426-428.
11. Safin A.R., Ivshin I.V., Gracheva E.I., Petrov T.I. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free-piston motor based on a synchronous electric machine of reciprocating action with permanent magnets. *News of higher educational institutions. Problems of energy*. 2020;22(1):38-48.
12. Tabachnikova TV, Gracheva EI, Naumov OV, et al. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Almet'yevsk, Republic of Tatarstan, 2020:012014.
13. Gracheva E., Toshkhodzhaeva M., Rahimov O., Dadabaev S., et. al. Modeling the Reliability of High-Voltage Power Transmission Lines Taking into Account the Influence of the Parameters of a Sharply Continental Climate. *International Journal of Technology*, 2020;11(8):1557-1569.
14. Khan MJ, Pushparaj. A novel hybrid maximum power point tracking controller based on artificial intelligence for solar photovoltaic system under variable environmental conditions. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021; 16(4), 1879-1889.
15. Yılmaz M, Kaleli A, Çorapsız MF. Machine learning based dynamic super twisting sliding mode controller for increase speed and accuracy of MPPT using real-time data under PSCs. *Renewable Energy*. 2023; 219, 119470
16. Aygül K, Cikan M, Demirdelen T, Tumay M. Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2023; 45(3), 8337-8355.
17. Bouarroudj N, Benlahbib B, Houam Y, Sedraoui M, Batlle VF, Abdelkrim T, et al. Fuzzy based incremental conductance algorithm stabilized by an optimal integrator for a photovoltaic system under varying operating conditions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2021; 1-26.
18. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities // *Journal of Mining Institute*. 2024. p. EDN UIZSOQ.

Authors of the publication

Timur I. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ali Nisrin Karim – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anastasia R. Petrova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **21.08.2024 г.**

Отредактировано **22.10.2024 г.**

Принято **25.10.2024 г.**