

УДК 004.896

DOI 10.34822/1999-7604-2020-4-21-27

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ТОЧКОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАССИВА

Е. А. Энгель [✉], Н. Е. Энгель

Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия

[✉]*E-mail: ekaterina.en@gmail.com*

Статья продолжает исследования авторов в области интеллектуальных систем слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива при неравномерной иррадиации. Разработана, апробирована при экспериментальном моделировании и логически спроектирована как программа для ЭВМ система слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива на основе модифицированной нечеткой нейросети. Сравнительное экспериментальное моделирование отражает эффективные и робастные результаты разработанной интеллектуальной системы в сравнении со стандартными системами слежения за точкой максимальной мощности на основе алгоритма возмущения и наблюдения или алгоритма роя частиц при равномерной и неравномерной иррадиации. Разработана модульная архитектура программы для ЭВМ «Система слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива на основе модифицированной нечеткой нейросети» и ее многоуровневая иерархия классов на языке UML.

Ключевые слова: нечеткая нейросеть, рекуррентная нейросеть, UML, МРРТ.

THE INTELLIGENT PHOTOVOLTAIC ARRAY MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEM

E. A. Engel [✉], N. E. Engel

Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

[✉]*E-mail: ekaterina.en@gmail.com*

The paper continues the study in the area of intelligent photovoltaic array maximum power point tracking (MPPT) systems under non-uniform insolation. We developed, tested, and logically designed the MPPT system of the photoelectric array based on a modified fuzzy neural network as software. The results of comparative experimental simulation demonstrate that the developed intelligent system achieves competitive performance and robustness, as compared to a classical MPPT system based on the perturbation and observation algorithm, or particle swarm optimization under non-uniform and uniform insolation. The modular architecture of the software “System for tracking the maximum power point of a photovoltaic array based on a modified fuzzy neural network” and its multi-level class hierarchy by UML are developed.

Keywords: fuzzy neural network, recurrent neural network, UML, MPPT.

Введение

Статья продолжает исследования авторов [1] в области интеллектуальных систем слежения за точкой максимальной мощности (далее – МРРТ) фотоэлектрического (далее – ФЭ) массива, создание которых является приоритетом государственной энергетической политики в соответствии с «Энергетической стратегией на период до 2035 года» [2]. Указанные системы обеспечивают энергоэффективность, относящуюся к числу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ. Актуальность и важность данного исследования обусловлена утвержденными Правительственной комиссией по высоким технологиям и инновациям несколькими технологическими платформами, среди которых «Интеллек-

туальная электроэнергетическая система России», «Малая распределенная энергетика», а также Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [3].

В работе [1] авторы разработали и экспериментально апробировали систему МРРТ ФЭ массива на основе модифицированной нечеткой нейросети (далее – МННС) при равномерной инсоляции. Данное научное исследование посвящено разработке системы МРРТ ФЭ массива на основе МННС в условиях как равномерной, так и неравномерной иррадиации. Особенность ФЭ массива при неравномерной иррадиации – наличие нескольких локальных максимумов и только одного глобального максимума.

В подавляющем большинстве контроллеров МРРТ в качестве алгоритма слежения за точкой максимальной мощности используется алгоритм возмущения и наблюдения (далее – P&O) ввиду простоты управляющих структур и реализации [4], имеющий следующие снижающие эффективность МРРТ недостатки: при неравномерной иррадиации не может выйти из области локального максимума, значительно снижая вырабатываемую мощность; невозможно точно определить момент достижения регулятором точки максимальной мощности; снижение иррадиации сглаживает вольтамперную характеристику, усложняя определение точки максимальной мощности (далее – МРР) вследствие малого изменения мощности в сравнении с изменением напряжения; при непрерывном повышении иррадиации генерируемый управляющий сигнал алгоритма движется в противоположную МРР сторону, снижая вырабатываемую мощность.

Для реализации контроллера МРРТ ФЭ массива при неравномерной иррадиации широко применяется алгоритм роя частиц (далее – PSO) [5]. Основным недостатком алгоритма PSO заключается в том, что ввиду своей вычислительной затратности он не обеспечивает в онлайн-режиме глобального МРР, генерируя стохастические значения опорного напряжения, значительно снижая вырабатываемую мощность.

Разработана и экспериментально апробирована система МРРТ ФЭ массива на основе МННС. Сравнительное экспериментальное моделирование отражает эффективные и робастные результаты разработанной интеллектуальной системы в сравнении со стандартными контроллерами МРРТ на основе алгоритма возмущения и наблюдения или алгоритма роя частиц как при равномерной, так и при неравномерной иррадиации.

Процедура передачи опорного напряжения не требует перепрошивки современного контроллера МРРТ и может быть реализована как программа для ЭВМ, реализующая эффективный алгоритм МРРТ. Поэтому целесообразно создание интеллектуальной системы слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического модуля на основе МННС и ее реализация как программы для ЭВМ.

Программа для ЭВМ «Система МРРТ ФЭ массива на основе МННС» обеспечит эффективность автоматического управления и максимизацию выработки ФЭ массива при неопределенности внешних и внутренних факторов, различных сезонных и погодных условий. Разработана модульная архитектура программы для ЭВМ «Система слежения за точкой максимальной мощности ФЭ массива на основе МННС» и ее многоуровневая иерархия классов на языке UML.

Республика Хакасия является одним из наиболее перспективных регионов, обладающих высоким природным потенциалом для развития солнечной энергетики. Величина годовой солнечной инсоляции для г. Абакана составляет около $1450 \text{ кВт} \times \text{ч}/\text{м}^2$ [6], что превышает значения для средней полосы Европейской части РФ (около $1200\text{--}1450 \text{ кВт} \times \text{ч}/\text{м}^2$) и соответствует, например, уровню инсоляции в южных районах Краснодарского края. Программа для ЭВМ «Система МРРТ ФЭ массива на основе МННС» предназначена для использования как на солнечных электростанциях, так и на ФЭ объектах электрического обеспечения удаленных туристических комплексов, деревень, сел и фермерских хозяйств (в том числе Республики Хакасии).

Интеллектуальная система МРРТ ФЭ массива

В работе [1] авторы разработали и экспериментально апробировали систему МРРТ ФЭ массива на основе МННС при равномерной инсоляции. Интеллектуальная система МРРТ ФЭ массива на основе МННС разработана и апробирована при равномерной и неравномерной иррадиации. Указанный фотоэлектрический массив состоит из четырех солнечных панелей, вырабатывающих максимум 1 000 Вт при значении иррадиации 1 000 Вт/м. Он представляет собой небольшую солнечную электростанцию, включающую 4 солнечные панели Sundragon i250-60P, 250 W, автономный МРРТ-контроллер 1 kW.

МННС F включает рекуррентные нейросети g_{jq} и обучается на наборе экспериментальных данных вида

$$s_k = (X_k = (V_k, I_k, \Delta I_k / \Delta V_k), u_k), \quad (1)$$

где V_k – текущее напряжение ФЭ массива;

I_k – текущая сила тока ФЭ массива;

ΔI_k – текущее приращение силы тока ФЭ массива;

ΔV_k – текущее приращение напряжения ФЭ массива;

u_k – сигнал управления (опорное напряжение), $k \in \overline{1..T}$.

Параметры архитектуры МННС $F(X_k, a)$ закодированы как частица a (веса и отклонения нейронов, $n \in \overline{1..N}$ – максимальное количество нейронов в скрытом слое рекуррентных нейросетей). Количество временных задержек – 1. Агенты $g_{jq}(X_k, a_{jq})$ МННС $F(X_k, a)$ мы сформировали как рекуррентные нейросети вида $g_{jq}(X_k, a_{jq})$, $q = \overline{1..3}$.

Алгоритмы формирования и функционирования МННС для решения задачи слежения за точкой максимальной мощности ФЭ массива подробно описаны в работе авторов [1].

Формирование интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива при равномерной и неравномерной инсоляции в условиях неопределенности на основе МННС

Сначала примеры вида (1) мы классифицировали на две группы в соответствии с режимом инсоляции ФЭ массива: A_1 – режим равномерной инсоляции ($C_t = -1$), A_2 – режим неравномерной инсоляции ($C_t = 1$). Указанная классификация сгенерировала вектор с элементами C_t . МННС F включает двухслойные рекуррентные нейросети $c(s_t)$ и g_{jq} (количество временных задержек равно 1). Векторы s_t и C_t являются для нейросети $c(s_t)$ входными и выходными сигналами соответственно. На основе выходного сигнала нейросети $c(s_t)$ формируются нечеткие множества A_j (A_1 – режим равномерной инсоляции, A_2 – режим неравномерной инсоляции) с соответствующими функциями принадлежности μ_j , где $j = \overline{1..2}$. Далее мы на основе модифицированного многомерного алгоритма роя частиц [1] обучаем МННС $F(X_k, a)$ на наборе экспериментальных данных вида (1). В результате генерируется оптимальная архитектура МННС.

Функционирование интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива при равномерной и неравномерной инсоляции в условиях неопределенности на основе настроенной МННС отражает рисунок 1.

На основе вектора s_t (вида (1)) нейросеть $c(s_t)$ генерирует выходной сигнал, который интерпретируется как вектор значений функции принадлежности μ . Функция $\text{ind max}_j(\mu_j) = \{j | \forall k \neq j \mu_j \geq \mu_k\}$ активирует j -й режим фотоэлектрической системы и МННС $F(X_k, x\bar{y}^{dbest})$ генерирует управляющий сигнал $u_{k+1} = \text{Fes} \left(g_{jk} \left(X_k, x\bar{y}_{jq}^{dbest} \right) \right)$ как результат нечетко-возможностного взаимодействия агентов субкультуры j -го режима $g_{jq} \left(X_k, x\bar{y}_{jq}^{dbest} \right)$ в соответствии с j -м режимом ФЭ массива.

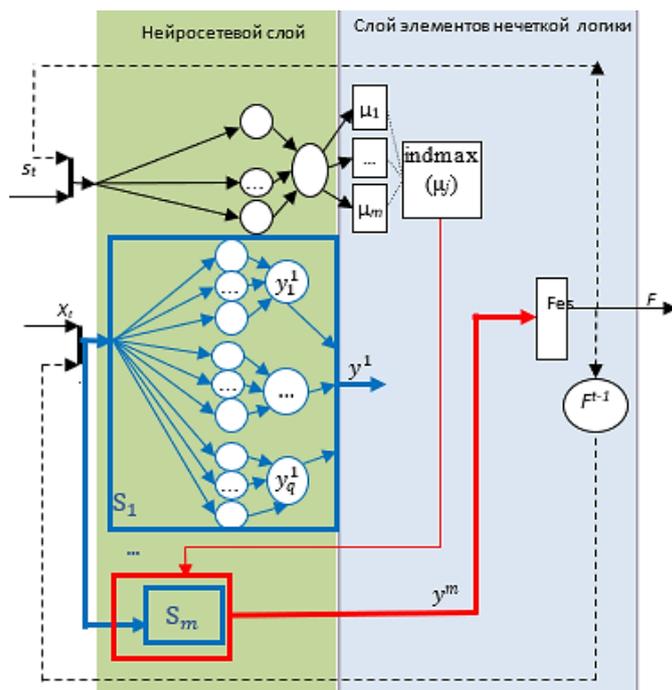


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива на основе МННС

Примечание: составлено авторами.

Результаты моделирования интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива

На основе данных вида (1) ($k = \overline{1..T}, T = 1\ 000\ 000$) алгоритмом формирования МННС $F(X_k, a)$ сгенерирована система МРРТ ФЭ массива на основе настроенной МННС $F(X_k, \overline{x\bar{y}^{d(n)}})$, $j = \overline{1..2}, q = \overline{1..3}$ алгоритмом ее формирования, подробно описанным в работе авторов [1].

Моделирование системы МРРТ ФЭ массива, состоящего из четырех модулей (вырабатывающих максимум 1 000 Вт при значении иррадиации 1 000 Вт/м), на основе настроенной МННС проведено по четырем сценариям изменения иррадиации (рис. 2):

- 1-й и 4-й сценарии – плавное изменение солнечного излучения при неравномерной инсоляции (например, утром или вечером, в условиях самозатенения солнечных панелей), $t \in [0; 0,5]$ и $[1,25; 1,5]$;
- 2-й сценарий – равномерная инсоляция, $t \in [0,5; 0,7]$;
- 3-й сценарий – плавное и устойчивое снижение солнечного излучения при неравномерной инсоляции вследствие плавного нарастания облачности, $t \in [0,7; 1,25]$.

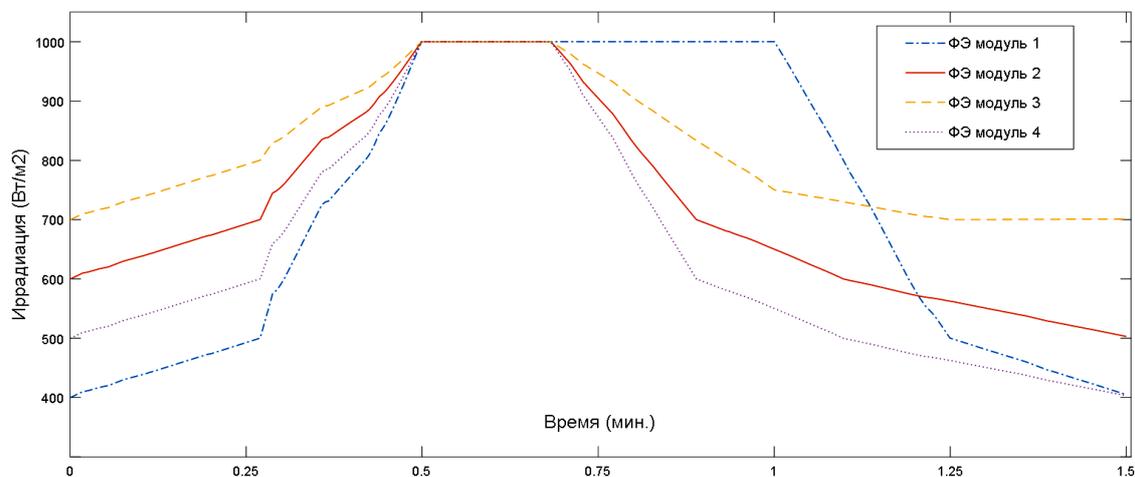


Рис. 2. График значений иррадиации фотоэлектрических модулей

Примечание: составлено авторами.

Представленный на рис. 3 график вырабатываемой мощности при всех сценариях показывает, что метод роя частиц ввиду своей вычислительной затратности не успевает в онлайн-режиме провести глобальную оптимизацию. Поэтому генерирует значения опорного напряжения, не обеспечивающие глобальный максимум электроэнергии, вырабатываемой массивом. На графике вырабатываемой мощности при всех сценариях неравномерной инсоляции видно, что алгоритм возмущения и наблюдения не может выйти из области локального максимума, в то время как разработанная интеллектуальная система МРРТ ФЭ массива генерирует значения опорного напряжения, обеспечивающие глобальный максимум электроэнергии, вырабатываемой массивом солнечных панелей. Разработанная система МРРТ ФЭ массива на основе настроенной МННС вырабатывает в среднем на 29,56 % и 38,85 % больше энергии, чем стандартная система МРРТ, основанная на алгоритме возмущения и наблюдения и методе роя частиц соответственно. Средняя оценка рассчитывалась следующим образом:

$$100 \% \times \sum_{t \in T} (P_{MFNN}^t - P^t) / P_{max}^t / \sum_{t \in T} 1,$$

где P_{MFNN} – энергия, вырабатываемая интеллектуальной системой МРРТ ФЭ массива;

P – энергия, вырабатываемая стандартной системой МРРТ, основанной на алгоритме PSO or P&O;

P_{max} – максимально возможная выработка ФЭ массива;

$t \in [0; 0,5] \cup [0,7; 1,5]$.

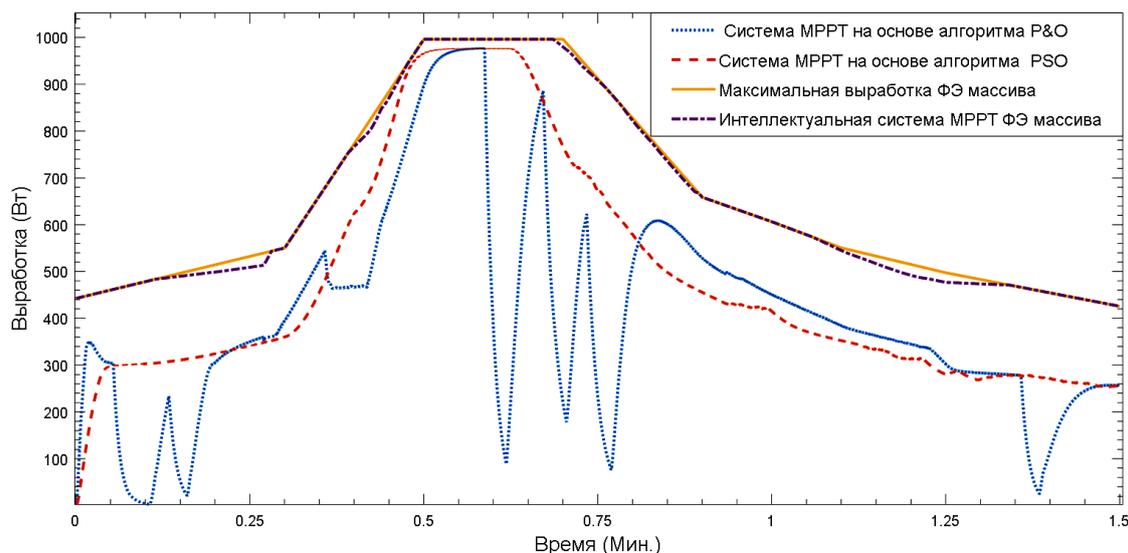


Рис. 3. График вырабатываемой мощности ФЭ массива

Примечание: составлено авторами.

Таким образом, результаты экспериментальной апробации при равномерной и неравномерной инсоляции показывают, что по сравнению со стандартной моделью с МРРТ-контроллером на основе алгоритма P&O или PSO разработанная интеллектуальная система МРРТ ФЭ массива обеспечивает большую мощность и робастна к воздействиям различного рода неопределенности ФЭ системы.

Архитектура программы для ЭВМ «Система МРРТ ФЭ массива на основе МННС»

Интеллектуальные системы моделирования фотоэлектрических объектов формируют виртуальную реальность – новый вид информационной производственной деятельности фотоэлектрических объектов. Описанные в работе авторов [1] и в предыдущем разделе результаты экспериментальных моделирований демонстрируют эффективность и робастность интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива на основе МННС в сравнении со стандартной моделью с МРРТ-контроллером на основе алгоритма P&O, возрастающей проводимости или

PSO при равномерной и неравномерной инсоляции в условиях воздействия различного рода неопределенности ФЭ системы. Таким образом, целесообразна реализация разработанной системы МРРТ ФЭ массива на основе МННС как программы для ЭВМ «Система слежения за точкой максимальной мощности ФЭ массива на основе МННС».

Архитектуру указанной программы для ЭВМ целесообразно организовать по блочно-модульному принципу, обеспечивающему ее гибкость и легкую модифицируемость, простоту добавления новых и модернизации существующих модулей, в том числе реализующих вспомогательные функции, например распознавания частичного затенения по изображению ФЭ массива и/или бесконтактной верификации оператора (описание которого выходит за рамки настоящей статьи). Ядро интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива – интеллектуальный регулятор МРРТ на основе МННС, т. е. модуль ФЭ массива можно заменить другим модулем, реализующим, например, ветрогенератор. Блочно-модульная архитектура интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива, реализованная средствами Microsoft Visio как схема, состоит из трех модулей (рис. 4).



Рис. 4. Архитектура программы для ЭВМ «Система слежения за точкой максимальной мощности ФЭ массива на основе МННС»

Примечание: составлено авторами.

Центральный модуль программы для ЭВМ «Система слежения за точкой максимальной мощности ФЭ массива на основе МННС» – интеллектуальный регулятор МРРТ на основе МННС. Диаграмма классов программы для ЭВМ «Система слежения за точкой максимальной мощности ФЭ массива на основе МННС», описанная на языке UML средствами Microsoft Visio, имеет многоуровневую иерархию и включает 7 классов (рис. 5).

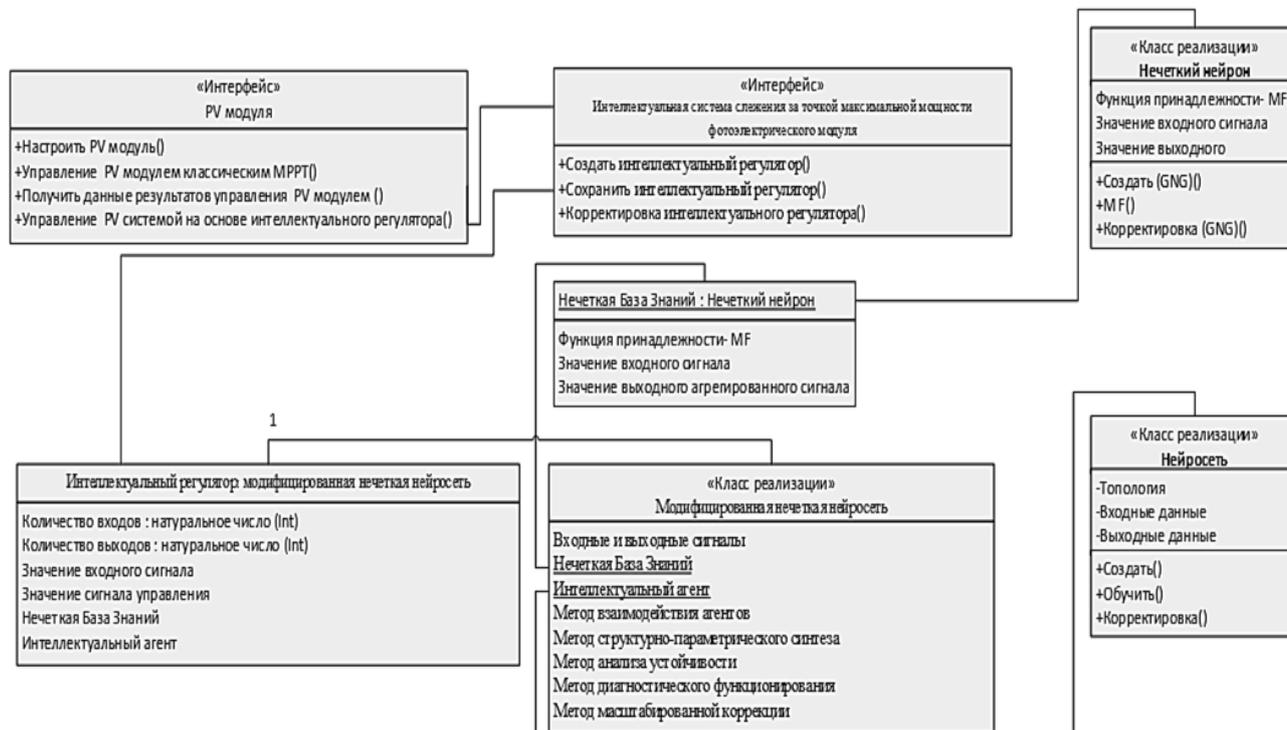


Рис. 5. Диаграмма классов интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива

Примечание: составлено авторами.

Базовый класс интеллектуальной системы МРРТ ФЭ массива – МННС с методами структурно-параметрического синтеза, анализа устойчивости, диагностического функционирования и масштабированной коррекции. Интеллектуальный регулятор – подкласс указанного класса.

Заключение

В рамках продолжения исследований авторов [1] в области интеллектуальных систем МРРТ ФЭ массива разработана, апробирована при экспериментальном моделировании и логически спроектирована как программа для ЭВМ система МРРТ ФЭ массива на основе МННС. Сравнительное экспериментальное моделирование отражает эффективные и робастные результаты разработанной интеллектуальной системы в сравнении со стандартными контроллерами МРРТ на основе алгоритма возмущения и наблюдения или алгоритма роя частиц как при равномерной, так и при неравномерной иррадиации в условиях воздействия различного рода неопределенности ФЭ системы.

Разработана модульная архитектура программы для ЭВМ «МРРТ ФЭ массива на основе МННС» и ее многоуровневая иерархия классов на языке UML средствами Microsoft Visio, обеспечивающими гибкость и легкую модифицируемость программы для ЭВМ, простоту добавления новых и модернизации существующих модулей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Хакасия в рамках научного проекта № 19-48-190003.

Литература

1. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Система слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива на основе модифицированной нечеткой нейросети // Вестник кибернетики. 2019. № 3. С. 14–25.
2. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года // Официал. сайт Министерства энергетики Рос. Федерации. 2019. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/1920/104837> (дата обращения: 15.11.2020).
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ. Доступ из СПС «КонсультантПлюс».
4. Logeswarana T., Senthilkumarb A. A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems under Uniform and Non-Uniform Irradiances // Energy Procedia. 2014. Vol. 54. P. 228–235.
5. Yau H.-T., Lin C.-J., Wu C.-H. Sliding Mode Extremum Seeking Control Scheme Based on PSO for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems // International Journal of Photoenergy. 2013. Vol. 2013.
6. Значение солнечной инсоляции в г. Абакан (Республика Хакасия) // Beta Energy. URL: <https://www.betaenergy.ru/insolation/abakan> (дата обращения: 17.11.2020).