

БЕСПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

У.А. Щеглова, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается проблема повышения энергоэффективности фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей), работающих в условиях с нестационарной плотностью светового потока и переменной нагрузки. Существо этой проблемы заключается в экстремальном характере ватт-амперных характеристик преобразователей, положение максимума отдаваемой мощности в которых изменяется в соответствии с указанными условиями эксплуатации. Это обстоятельство приводит к существенному снижению коэффициента использования батарей по мощности. Ставится задача автоматического поддержания положения рабочей точки батареи в точке с максимальной мощностью, отдаваемой в нагрузку. Для решения этой задачи предложен беспойсковый способ определения текущего положения экстремума, который использует рабочие движения системы управления батареями, обусловленные широтно-импульсной модуляцией её тока. Применена параллельная схема управления током преобразователя, что даёт возможность в режиме с постоянной плотностью светового потока при переменной нагрузке поддерживать постоянной не только отбираемую от батареи мощность, но и напряжение на её выходе. В режиме с переменной плотностью светового потока предложенная система переходит в режим динамического слежения за точкой экстремума мощности. Для обеспечения устойчивых переключений в малых окрестностях экстремума введена нелинейная статическая характеристика регулятора, формируемая системой нечётких решающих правил. Приведены результаты модельных экспериментов, подтверждающих работоспособность предложенного способа экстремального управления

Ключевые слова: источники возобновляемой энергии, фотоэлектрические преобразователи, точка максимальной мощности, экстремальное управление

Введение

В настоящее время в перечне используемых альтернативных видов энергии, возобновляемых или поступающих на Землю естественным путём, доминирующую роль занимает солнечная энергия [1, 2]. Этому способствует не только доступность солнечной энергии на большей части земного шара, но и быстрое снижение стоимости оборудования, необходимого для преобразования энергии света в электрическую энергию [3].

Наиболее важным функциональным элементом такого оборудования являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи, конструктивно объединяемые в солнечные батареи [4]. Энергетическую эффективность солнечных батарей характеризуют два показателя:

1) коэффициент полезного действия – доля солнечной энергии, преобразуемая батареями в электрическую энергию. Этот показатель для батарей массового применения не превышает 30 %, и для его повышения ведётся поиск новых полупроводниковых материалов и их сочетаний [5];

2) коэффициент использования электрической мощности солнечной батареи, определяе-

мый как отношение фактически отбираемой от батареи электрической мощности к максимальному значению мощности батареи, которую она способна отдать потребителям при данных условиях освещения и температуре. На рис. 1 показаны кривые изменения мощности P солнечной батареи при изменении отдаваемого ею тока I и различной плотности J светового потока.

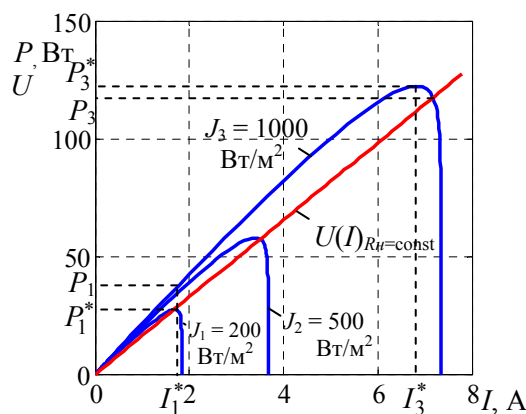


Рис. 1. Зависимость напряжения U и мощности P солнечной батареи от тока I нагрузки и плотности J светового потока

Из рис. 1 следует, что зависимость мощности от нагрузки носит экстремальный характер, и положение экстремума отбираемой мощ-

ности существенно изменятся при изменении плотности светового потока. Это изменение при постоянном значении отдаваемого тока (например, $I_1^* = \text{const}$ на рис. 1) приводит к тому, что батарея будет многократно недоиспользована по мощности $P_1 \ll P_3^*$. Если батарея функционирует в режиме работы с постоянным сопротивлением нагрузки ($R_n = \text{const}$, рис. 1), коэффициент использования снижается в меньшей степени, но по-прежнему остаётся заметно меньшим единицы, в частности: $P_3 < P_3^*$.

Таким образом, при практической эксплуатации солнечных батарей возникает актуальная задача автоматического поддержания (стабилизации) их состояния в точке с максимальной отдаваемой мощностью.

Наиболее распространенный способ решения этой задачи содержит следующие процедуры [6, 7, 8, 9]:

введение в процесс работы системы стабилизации специального поискового возмущающего воздействия;

наблюдение реакции системы на это воздействие;

последующая оценка расположения рабочей точки батареи относительно экстремума;

выработка управления, перемещающего текущую рабочую точку в сторону экстремума.

Принципиальным недостатком этого способа является необходимость выявления реакции системы на специальное возмущающее воздействие на фоне аналогичных реакций системы на непрерывно изменяющиеся текущие

условия её функционирования – плотность светового потока и сопротивление нагрузки [10, 11]. Кроме того, известные алгоритмы экстремального управления при неизменяющемся световом потоке отдадут в нагрузку также неизменяющийся оптимальный ток I^* (рис. 1), хотя потребность потребителей в этом токе не является постоянной.

Целью предлагаемой работы является:

построение беспоиcкового алгоритма автоматического поддержания состояния солнечной батареи в точке с максимальной отдаваемой мощностью, использующего собственные рабочие движения системы и обеспечивающего при этом отслеживание требуемого тока нагрузки в режиме с постоянной плотностью светового потока;

апробация регулятора системы управления, построенного на основе набора нечётких решающих правил;

исследование работоспособности полученной системы экстремального управления в условиях изменяющихся сопротивления нагрузки и плотности светового потока.

Алгоритм беспоиcкового экстремального управления

Для достижения заявленных целей работы откажемся от традиционной последовательной схемы управления током батареи и воспользуемся параллельным включением управляющего ключевого элемента в соответствии с рис. 2.

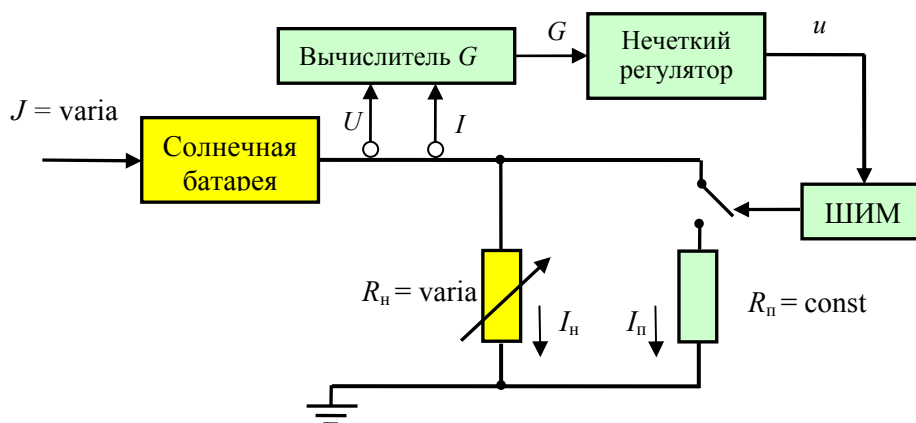


Рис. 2. Функциональная схема системы экстремального управления

Основная группа потребителей обозначена на рис. 2 переменным резистором R_n , ток через который в режиме постоянного напряжения U на батарее также будет изменяться. Поскольку средний ток I солнечной батареи определяется суммой:

$$I = I_n + I_{\text{п}} , \quad (1)$$

то, управляя ключом с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ), можно изменять средний ток $I_{\text{п}}$, протекающий через па-

параллельную часть нагрузки, обозначенную постоянным резистором R_n , изменение тока через которую не является критичным (например, нагревательные элементы).

На рис. 2 обозначены также датчики напряжения U и тока I на выходе солнечной батареи. На основании текущих значений этих величин необходимо вычислить оценку G расположения рабочей точки батареи относительно текущего экстремума мощности.

Способ вычисления этой оценки показан на рис. 3.

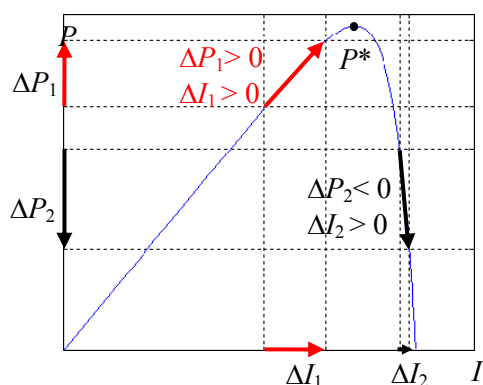


Рис. 3. Способ определения расположения текущей рабочей точки батареи относительно точки с максимальной отдаваемой мощностью

Синхронное измерение тока ΔI и напряжения ΔU через заданные интервалы времени позволяет вычислять приращения этих величин ΔI , ΔU , приращение мощности ΔP :

$$\Delta P = \Delta I \cdot \Delta U, \quad (2)$$

и, далее, оценку G :

$$G = \Delta P \cdot \Delta U, \quad (3)$$

знак которой указывает на расположение текущей рабочей точки относительно экстремума, а амплитуда — на близость к нему.

Действительно, если по рис. 3 рабочая точка расположена левее экстремума, то $G > 0$, если правее, то $G < 0$. В окрестностях экстремума $G \approx 0$. В работе [11] отмечалось, что полученная оценка выполняет роль градиента функции мощности относительно тока:

$$G \sim \nabla P(I), \quad (4)$$

но в отличие от [11], в данном случае используется не только знак оценки G , но и её амплитуда, дающая возможность реализовать непрерывное управление движением к экстремуму в

силу того, что по мере приближения к последнему амплитуда оценки G стремится к нулю, и процесс движения автоматически завершается в окрестностях экстремума.

Вышесказанное подтверждает рис. 4, на котором показан процесс изменения оценки G при прохождении рабочей точки через экстремум (G — мгновенные значения, \bar{G} — средние значения за 10 периодов квантования).

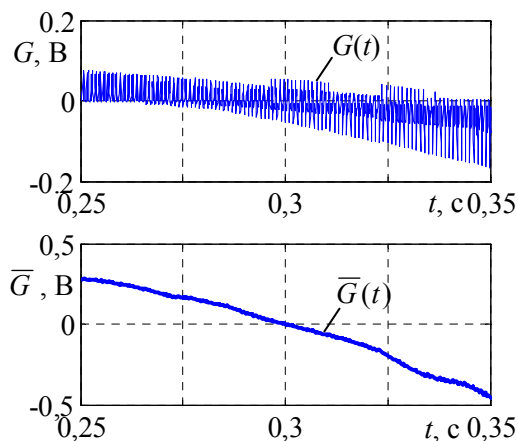


Рис. 4. Процесс изменения оценки G при прохождении рабочей точки через экстремум

Важно отметить, что процесс получения информации о приращениях тока и напряжения совмещён с процессом регулирования с помощью ШИМ, работа которого приводит к неизбежным пульсациям (приращениям) всех электрических величин в системе. То есть процесс движения к экстремуму мощности имеет бесперебойный характер и не требует введения пробных возмущений.

Нечёткий регулятор системы управления

Использование оценки G для непосредственного управления широтно-импульсным модулятором может привести к колебательному характеру процесса движения к экстремуму вплоть до потери устойчивости системы. По этой причине в контур системы следует вводить дополнительный регулятор, обеспечивающий требуемое качество управления.

В рассматриваемом случае для устранения колебательности переходных процессов используется нелинейная характеристика регулятора, сформированная в виде поверхности в координатах оценки G и её градиента во времени ∇G с помощью системы нечётких решающих правил, хорошо приспособленных для синтеза нелинейных законов управления.

Входными лингвистическими переменными системы являются оценка \tilde{G} с нечёткими значениями:

$$\tilde{G} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}, \quad (5)$$

где α_1 – нечёткая переменная «намного меньше нуля», α_2 – «немного меньше нуля», α_3 – «около нуля», α_4 – «немного больше нуля», α_5 – «намного больше нуля»; и градиент:

$$\nabla \tilde{G} = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5\}, \quad (6)$$

с аналогичными нечёткими переменными.

Выходная лингвистическая переменная u также формируется в виде лингвистической переменной \tilde{u} :

$$\tilde{u} = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\}, \quad (7)$$

нечёткие значения которой имеют смысл: γ_1 – нечёткая переменная «намного уменьшить», γ_2 – «немного уменьшить», γ_3 – «не изменять», γ_4 – «немного увеличить», γ_5 – «намного увеличить».

Функции принадлежности μ_α переменных α_i ($i = 1, \dots, 5$) показаны на рис. 5. Функции принадлежности для переменных β_i и γ_i имеют аналогичный вид.

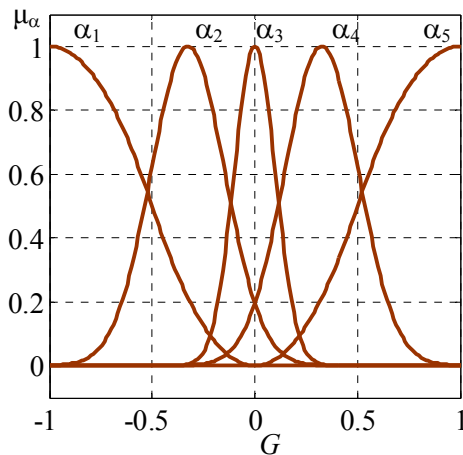


Рис. 5. Функции принадлежности μ_α нечётких переменных α_i , $i = 1 \dots 5$

Система решающих правил представлена в табл. 1.

Таблица 1

Решающие правила для переменной \tilde{u}

\tilde{G}	$\nabla \tilde{G}$				
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5

α_1	γ_1	γ_1	γ_1	γ_2	γ_3
α_2	γ_1	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
α_3	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5
α_4	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_5
α_5	γ_3	γ_4	γ_5	γ_5	γ_5

Нелинейность сформированной поверхности управления иллюстрируется рис. 6.

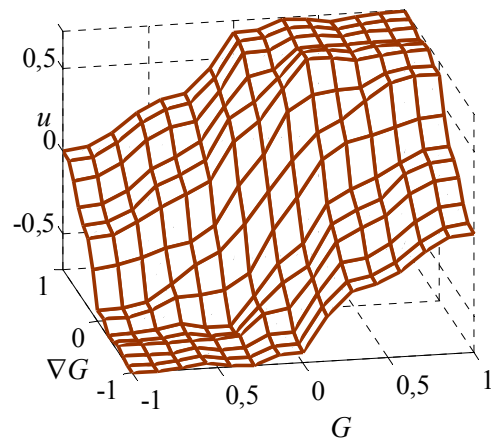


Рис. 6. Нелинейная поверхность управляющего воздействия u

Исследование системы экстремального управления

Для исследования показателей качества синтезированной системы использовалась схема, представленная на рис. 2, в которой выбраны: солнечная батарея с ватт-амперной характеристикой, показанными на рис. 1; $R_n = 3 \dots 40$ Ом; $R_n = 2$ Ом; плотность светового потока $J = 100 \dots 1000$ Вт/м²; напряжение холостого хода при максимальной плотности светового потока $U_{xx} = 21,6$ В; ток короткого замыкания при максимальной плотности светового потока $I_{кз} = 7,34$ А.

Проводились следующие модельные эксперименты:

проверка удержания экстремума мощности при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки и постоянной плотности светового потока;

проверка отслеживания системой точки максимальной мощности при изменении плотности светового потока и постоянном сопротивлении нагрузки.

Результаты экспериментов приведены на рис. 7.

На рис. 7, а сопротивление нагрузки скачком увеличивалось от значения 2,6 Ом до значения 8 Ом, на рис. 7, б — уменьшалось от значения 2,6 Ом до значения 1,4 Ом при постоянной плотности светового потока $J = 1000 \text{ Вт/м}^2$. При этом ток нагрузки изменялся от 6,85 А до, соответственно, 2,6 А и 7,4 А.

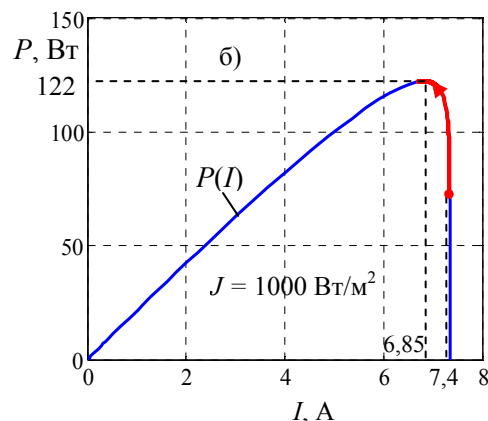
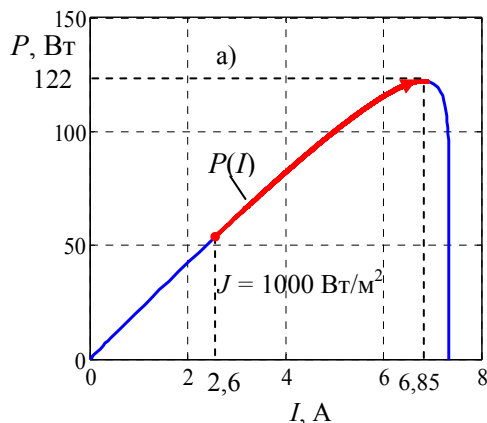


Рис. 7. Процессы приведения состояния батареи в точку максимальной мощности при изменении нагрузки: а) при уменьшении тока нагрузки; б) при увеличении тока нагрузки

Время возвращения в точку экстремума для указанных параметров эксперимента составило не более 0,4 с, что вполне приемлемо для реальных условий эксплуатации солнечных батарей. Существенно, что в окрестностях точки экстремума в системе происходят непрерывные рабочие колебания, вызванные работой широтно-импульсного модулятора. Следует также отметить, что стабилизация точки максимальной мощности в режиме с постоянной плотностью светового потока означает одновременную стабилизацию значения напряжения на нагрузке, в то время как сопротивление R_n и ток I_n нагрузки изменяются.

Результаты работы системы в режиме с переменной плотностью светового потока показаны на рис. 8.

Рис. 8, а иллюстрирует изменение плотности светового потока от значения 100 Вт/м^2 до значения 300 Вт/м^2 за время 0,4 с. В соответствии с этим изменением ток, отдаваемый солнечной батареей, также увеличивается, причём рабочая точка батареи постоянно поддерживается в окрестностях смещающегося экстремума её мощности, рис. 8, б.

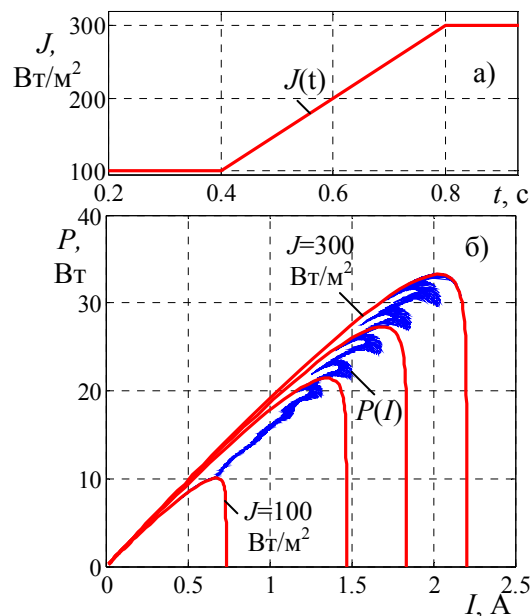


Рис. 8. Процесс динамического отслеживания системой точки экстремума при изменении плотности светового потока

Заключение

1. Предложенная система экстремального управления состоянием фотоэлектрического преобразователя позволяет определять текущее положение рабочей точки преобразователя относительно экстремума его ватт-амперной ха-

рактеристики без использования специальных возмущающих воздействий, вводимых в систему для этой цели. Роль этих воздействий выполняют рабочие движения в системе, вызванные широтно-импульсным регулированием тока, отбираемого от преобразователя.

2. Используемая в системе схема параллельного управления током даёт возможность в режиме с постоянной плотностью светового потока одновременно со стабилизацией точки максимальной мощности поддерживать постоянным напряжение на выходе преобразователя при переменном сопротивлении в цепи потребителей.

3. В режиме с переменной плотностью светового потока система обеспечивает слежение за смещением точки экстремума в реальном масштабе времени.

4. Применение в системе управления регулятора с нечёткими решающими правилами позволяет реализовать нелинейную поверхность его статической характеристики, обеспечивающую непрерывные колебания системы в окрестностях точки экстремума.

Литература

1. Global energy review 2025 / International Energy Agency. France: IEA, 2025. 41 p.
2. Renewable energy technology / F.R.S. Maging, Y.S. Chan, Y.H. Tan, M.D.M. Samsudin // Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy and Environmental Technology for Circular Economy, Bangkok, Thailand. 2024. P. 75-83.
3. Кудрявцева О.В., Васильев С.В., Зорина Т.Г. Эффективность реализации программы поддержки возобновляемой энергетики (на примере солнечной энергетики) // Russian Journal of Economics and Law. 2023. Т. 17. №. 4. С. 745-774.
4. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Моделирование и анализ устойчивости системы преобразования энергии солнечной батареи космической станции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 20. № 3. С. 44-51.
5. Моделирование полупроводниковых гетероструктур для преобразователей энергии и датчиков / М.В. Долгополов [и др.] // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2024. Т. 30(1). С. 64-81.
6. Пученкин А.В. Регулятор точки максимальной мощности для солнечных батарей // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГЭУ, 2011. С. 60-63.
7. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей / Ю.А. Шиняков [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № (8-9). С. 12-18.
8. Maximum power extraction from solar PV systems using intelligent based soft computing strategies: A critical review and comprehensive performance analysis / A. Saxena, R. Kumar, M. Amir, S.M. Mueeen // Heliyon. 2024. Vol. 10. Issue 2. E22417.
9. Eltamaly A.M., Farh H.M.H., Abokhalil A.G. A novel PSO strategy for improving dynamic change partial shading photovoltaic maximum power point tracker // Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects. 2024. Vol. 46. No. 1. P. 8736-8750.
10. Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 76-93.
11. Бураков М.В., Шишлаков В.Ф. Нечёткое управление солнечной батареей // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5. С. 62-70.

Поступила 05.06.2025; принята к публикации 28.08.2025

Информация об авторах

Щеглова Ульяна Александровна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20

Васильев Евгений Михайлович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364

SEARCHLESS SYSTEM OF EXTREME CONTROL OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

U.A. Shcheglova, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the problem of increasing the energy efficiency of photovoltaic converters (solar batteries) operating under conditions of non-stationary luminous flux density and variable load is solved. The essence of this problem lies in the extreme nature of the watt-ampere characteristics of the converters, the position of the maximum output power in which changes in accordance with the specified operating conditions. This circumstance leads to a significant decrease in the battery utilization factor by power. The task is set to automatically maintain the position of the battery operating point at the point with the maximum power output to the load. To solve this problem, a search-free method for determining the current extremum position is proposed, which uses the working movements of the battery control system caused by the pulse-width modulation of its current. A parallel current control circuit of the converter is used, which makes it possible to maintain not only the power taken from the battery constant in the mode with a constant luminous flux density under a variable load, but also a constant voltage at

its output. In the mode with a variable luminous flux density, the proposed system switches to the mode of dynamic tracking of the power extremum point. To ensure stable switching in small extremum neighborhoods, a nonlinear static characteristic of the controller is introduced, formed by a system of fuzzy decision rules. The results of model experiments are presented, confirming the operability of the proposed method of extremal control

Key words: renewable energy sources, photovoltaic converters, maximum power point, extreme control

References

1. International Energy Agency “Global energy review 2025”, France: IEA, 2025, 41 p.
2. Majing F.R.S., Chan Y.S., Tan Y.H., Samsudin M.D.M. “Renewable energy technology”, *Proc. of the Int. Conf. on Sustainable Energy and Environmental Technology for Circular Economy*, Bangkok, Thailand, 2024, pp. 75-83.
3. Kudryavtseva O.V., Vasil’ev S.V., Zorina T.G. “Efficiency of the implementation of the renewable energy support program (on the example of solar energy)”, *Russian Journal of Economics and Law*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 745-774.
4. Tishchenko A.K., Vasil’ev E.M., Tishchenko A.O. “Modeling and stability analysis of the energy conversion system of the solar battery of the space station”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 44-51.
5. Dolgoplov M.V., Elisov M.V., Radzhapov S.A., Rakhmankulov I.R., Chipura A.S. “Modeling of semiconductor heterostructures for energy converters and sensors”, *Bulletin of Samara University. Natural Science Series (Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya)*, 2024, vol. 30, issue 1, pp. 64-81.
6. Puchenkin A.V. “Maximum power point controller for solar batteries”, *Proc. of the Int. Scientific-Practical Conf.: State and Prospects of Development of Electrotechnology (Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii)*, Ivanovo, 2011, pp. 60-63.
7. Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Osipov A.V., Chernaya M.M. “Autonomous power plant with extreme step-by-step regulator of solar battery power”, *Alternative Energy and Ecology (Alternativnaya energetika i ekologiya)*, 2015, no.(8-9), pp. 12-18.
8. Saxena A., Kumar R., Amir M., Muyeen S.M. “Maximum power extraction from solar PV systems using intelligent based soft computing strategies: a critical review and comprehensive performance analysis”, *Heliyon*, 2024, vol. 10, issue 2, E22417.
9. Eltamaly A.M., Farh H.M. H., Abokhalil A.G. “A novel PSO strategy for improving dynamic change partial shading photovoltaic maximum power point tracker”, *Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects*, 2024, vol. 46, no. 1, pp. 8736-8750.
10. Malinin G.V., Serebryannikov A.V. “Tracking the maximum power point of a solar battery”, *Bulletin of Chuvash University (Vestnik Chuvashskogo universiteta)*, 2016, no. 3, pp. 76-93.
11. Burakov M.V., Shishlakov V.F. “Fuzzy control of a solar battery”, *Information and Control Systems (Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy)*, 2017, no. 5, pp. 62-70.

Submitted 05.06.2025; revised 28.08.2025

Information about the authors

Ul’jana A. Shcheglova, MA, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: (473) 243-77-20

Evgeniy M. Vasil’ev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364