

Разработка эффективного контроллера отслеживания точки максимальной мощности для фотоэлектрической системы

¹*ҚҰТТЫБАЙ Нұржігіт Бақытұлы, PhD, и.о. доцента, nurjigit.10.93@gmail.com,

¹ЕСЕН Бегім Ержанұлы, магистрант, begim.yesen@gmail.com,

¹ҚОШҚАРБАЙ Нұрсұлтан Жалғасұлы, докторант, koshkarbay.nursultan@gmail.com,

¹ЖОЛАМАНОВ Батырбек Нұрыллаұлы, докторант, batyrbek149@gmail.com,

¹БОЛАТБЕК Асхат Бауыржанұлы, докторант, bolatbekaskhat98@gmail.com,

¹НАО «Казахский национальный университет имени аль-Фараби», пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Представлен метод улучшения производительности автономных фотоэлектрических систем с использованием контроллера заряда батареи, оснащенного технологией отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) солнечных панелей. Сегодня контроллер ОТММ является эффективной технологией, обеспечивающей идеальное функционирование солнечных панелей путем поиска и выбора оптимальной точки питания. Цель исследования заключается в разработке и оценке эффективности контроллера заряда батарей для солнечных панелей на основе метода отслеживания точки максимальной мощности. Предложенный метод использует алгоритм возмущения и наблюдения, а также осуществляет отслеживание точки максимальной мощности на основе выходных характеристик тока и напряжения. В рамках исследования был использован понижающий преобразователь постоянного тока. Модель предложенного метода была реализована в программной среде Matlab Simulink, и была оценена эффективность алгоритма работы. Кроме того, на основе данной модели был разработан контроллер ОТММ, который прошел тестирование в реальных условиях. Также была проведена оценка надежности предложенного метода. В результате исследования была выявлена эффективность разработанной системы путем сравнительного анализа с коммерческим контроллером заряда батареи.

Ключевые слова: контроллер заряда батареи, солнечная панель, преобразователь постоянного тока, радиация, аккумулятор, датчики.

Введение

Для повышения эффективности фотоэлектрических систем (ФЭС) используются контроллеры постоянного тока с различными алгоритмами и методами функционирования. Одними из таких контроллеров являются контроллеры отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) [1]. Контроллеры ОТММ обеспечивают повышение эффективности работы солнечной панели путём «вытягивания» максимального количества энергии за счет выбора необходимой нагрузки в различных условиях. Также контроллеры увеличивают срок службы фотоэлектрической системы [2]. Были разработаны и реализованы различные методы ОТММ. Эти методы можно дифференцировать по различным характеристикам, включая типы

требуемых датчиков, скорость сходимости, стоимость, диапазон эффективности, требования к аппаратному обеспечению, популярность [3].

ОТММ системы по принципу функционирования можно классифицировать на две группы: косвенные и прямые, или же онлайн и офлайн [4]. Косвенные контроллеры ОТММ работают на основе параметров тока короткого замыкания и напряжения холостого хода фотоэлектрической панели или на математических соотношениях. Такие системы не могут подстроиться под конкретные погодные условия [5]. Прямые методы могут отслеживать ТММ в любых погодных условиях. Скорость определения точки максимальной мощности зависит от величины изменения рабочей точки (также называе-

мой размером шага) [6]. Наиболее часто используемыми прямыми методами являются: возмущение и наблюдение и инкрементная проводимость, благодаря своей низкой стоимости и простоте реализации на цифровом контроллере [7, 8]. Основные преимущества данных методов заключаются в том, что они совместимы с любыми фотоэлектрическими модулями, не требуют информации о солнечной панели, увеличивают срок службы солнечных батарей и количество циклов заряда-разряда аккумуляторов [9].

В настоящей статье представлено исследование контроллера заряда батарей, основанного на методе отслеживания точки максимальной мощности в системах солнечных панелей. Основным направлением исследования было определение параметров понижающего преобразователя постоянного напряжения для солнечной панели с номинальной мощностью 60 Вт. Алгоритм функционирования разработанного контроллера базируется на принципе возмущения и наблюдения, что обеспечивает эффективное отслеживание и оптимизацию точки максимальной мощности в системе. Моделирование контроллера заряда батарей проведено с использованием программных сред Matlab и Simulink (2017), что позволило оценить его производительность в виртуальной среде. Далее был собран электронный блок контроллера, который был подвергнут тщательным тестам в реальных условиях. Результаты исследования представлены в виде графиков, демонстрирующих эффективность работы контроллера в реальных условиях, и их сопоставления с данными моделирования. Проведенный анализ подтвердил высокую энергетическую эффективность разработанного контроллера, достигающую 95%. Эта работа не только предоставляет технические детали разработанного контроллера, но также подчеркивает его применимость в практических сценариях, что делает ее важным вкладом в область развития солнечных энергетических систем и технологий зарядки батарей.

Материалы и методы

Фотоэлектрическая система состоит из нескольких взаимосвязанно работающих блоков. Солнечная батарея питает преобразователь постоянного или постоянно-переменного тока, соответственно они могут использоваться в системах зарядки аккумуляторов или подключиться к сети переменного тока. Блок ОТММ наблюдает за выходным током и напряжением на клеммах солнечной батареи и контролирует входное напряжение или входной ток преобразователя, заставляя панель работать в точке максимальной мощности.

Нами используемая солнечная панель имеет следующие характеристики: SAKO POLY – 60W; выходная мощность при стандартных условиях окружающей среды 60 Вт; состоит из 12 последовательных и параллельных солнечных элементов, связанных между собой; выходной ток и напряжение в точке максимальной мощности 3,33 А и 18,2 В; напряжение холостого хода 22,7 В; ток короткого замыкания 3,66 А.

В качестве преобразователя постоянного тока будет использоваться понижающий преобразователь, который предназначен для снижения уровня выходного напряжения по сравнению с уровнем входного напряжения (рисунок 1). Эти преобразователи являются неотъемлемыми компонентами автономных солнечных фотоэлектрических систем. Их универсальность позволяет им эффективно управлять передачей энергии и согласованием напряжения между различными компонентами, что способствует повышению эффективности этих солнечных фотоэлектрических систем.

Составляющие компоненты были рассчитаны с использованием определенных уравнений, учитывая мощность, поступающую от солнечной панели (таблица 1). Основными компонентами являются: силовой транзистор (2SK1058), катушка индуктивности, конденсатор, силовой диод (SCS308АН).

Для определения катушки индуктивности (L) и конденсаторов (C) применяются следующие уравнения [10]:

$$L = \left(\frac{V_{\text{вх}} - V_{\text{вых}}}{\Delta i_L f} \right) D = \frac{V_{\text{вых}}(1-D)}{\Delta i_L f}, \quad (1)$$

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_{\text{вых}}}{V_{\text{вых}}} \right) f^2}. \quad (2)$$

Здесь, $V_{\text{вх}}$ и $V_{\text{вых}}$ соответственно напряжение на входе и выходе преобразователя, D коэффициент заполнения, f частота переключения транзистора, Δi_L ток, протекающий через дроссель, $\Delta V_{\text{вых}}$ дополнительные пульсации выходного напряжения из-за ЭПС конденсаторов.

$$D = \frac{V_{\text{вых}}}{V_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

$$\Delta i_L = \frac{(V_{\text{вх}} - V_{\text{вых}}) \times D}{f \times L}, \quad (4)$$

$$\Delta V_{\text{вых}} = \text{ЭПС} \times \Delta i_L. \quad (5)$$

Здесь ЭПС – эквивалентное последовательное сопротивление используемого выходного конденсатора.

Переключение транзистора осуществляется контроллером, который отслеживает

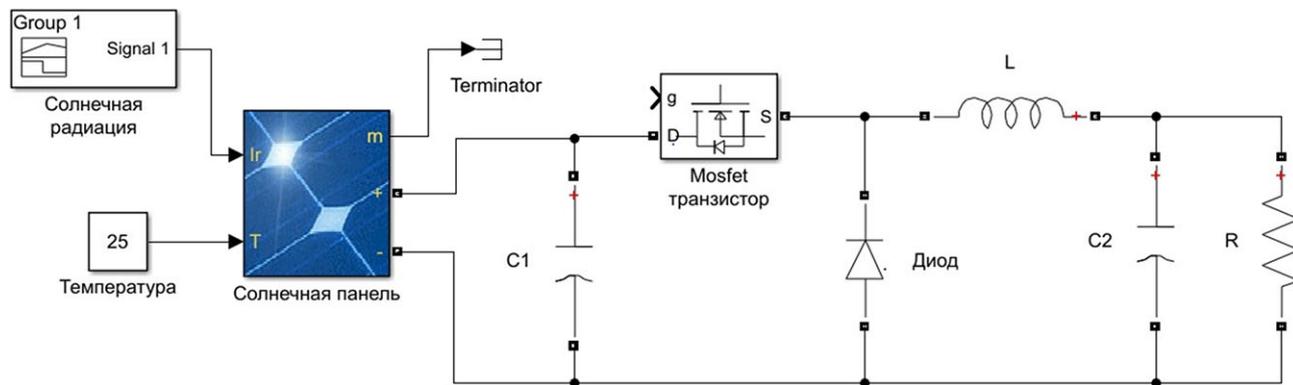


Рисунок 1 – Схема понижающего преобразователя постоянного напряжения

Таблица 1 – Параметры компонентов понижающего преобразователя постоянного напряжения

L, мкГн	C, мкФ	ЭПС, Ом	f, кГц	D, %	ΔI_L , А	$\Delta V_{\text{вых}}$, В
Более >171	Более >50	0,1	20	80	0,8	0,012

точку максимальной мощности, анализируя выходные значения тока и напряжения солнечной панели. Отслеживание точки максимальной мощности выполняется с использованием алгоритма возмущения и наблюдения. В ходе этого процесса контроллер периодически регулирует работу системы, изменяя коэффициент заполнения (D). Алгоритм возмущения и наблюдения предусматривает изменение параметров системы с последующим мониторингом выходных значений. Таким образом, контроллер стремится достичь точки, при которой мощность выхода солнечной панели максимальна.

Алгоритм работы контроллера отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) представлен на рисунке 2. Контроллер считывает значения напряжения (V_{n-1}) и тока (I_{n-1}), производимые солнечной панелью, измеряя их с помощью вольтметра и амперметра. Полученные данные используются для вычисления электрической мощности (P_{n-1}). Значения напряжения и вычисленной мощности сохраняются для использования в следующем цикле работы.

В следующем рабочем цикле вычисляется фактическая производимая электрическая мощность солнечной панели (P_n). Затем сохраненные и фактические электрические мощности сравниваются между собой. В случае, если фактическая мощность меньше, а фактическое напряжение (V_n) больше предыдущего, коэффициент заполнения увеличивается на постоянное значение (ΔD). Если фактическое напряжение меньше предыдущего значения, то коэффициент заполнения

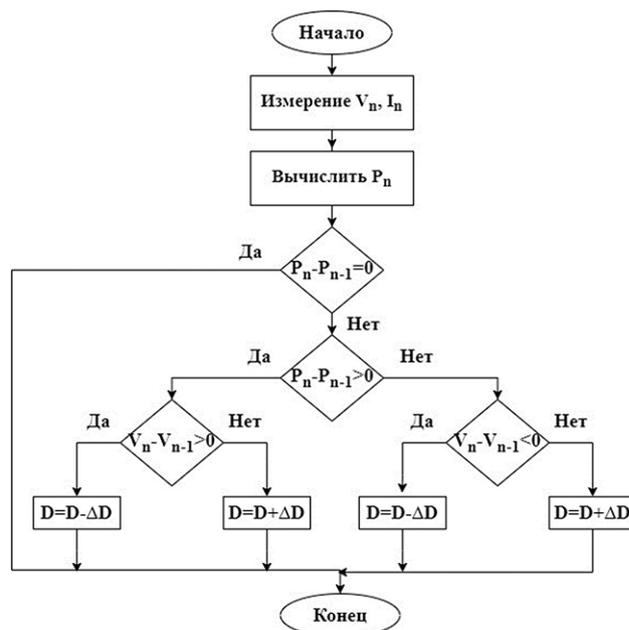


Рисунок 2 – Алгоритм работы возмущения и наблюдения

уменьшается на постоянное значение.

При сравнении, если фактическая мощность больше, а фактическое напряжение меньше по сравнению с предыдущими значениями, коэффициент заполнения увеличивается. В противном случае коэффициент заполнения уменьшается. Эти операционные циклы непрерывно повторяются до тех пор, пока солнечная панель функционирует и фактические и предыдущие электрические значения не становятся равными.

Результаты и обсуждение

Исследуемый контроллер ОТММ с алгоритмом возмущения и наблюдения был смоделирован в программной среде Matlab, Simulink (рисунок 3). Как мы уже упомянули, контроллер работает с понижающим преобразователем постоянного тока и рассчитан для солнечной панели мощностью 60 Вт. Солнечная панель, основываясь на заданных величинах солнечной радиации и температуры, производит определенное количество электрической мощности.

На выходе солнечной панели установлены датчики напряжения и тока, которые передают измеренные величины тока и напряжения в функцию Matlab для управления преобразователем в эффективном режиме на основе алгоритма возмущения и наблюдения. На выходе преобразователя также установлены датчики тока и напряжения. С их помощью можно сравнить входную и выходную величины электрической мощности, а также наглядно определить эффективность исследуемого контроллера ОТММ.

В каждой модели фотоэлектрической батареи проводилось исследование при номинальных условиях работы ($G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ и $T = 25^\circ\text{C}$) с целью обеспечения корректности функционирования. В рамках наших экспериментов использовались различные уровни солнечной инсоляции, изменяющиеся в разные временные интервалы (таблица 2), при постоянной температуре.

Путем ввода данных из таблицы 2 были получены значения мощности, тока и напряжения, которые подвержены изменениям в зависимости от освещенности и температуры. Результаты моделирования представлены на рисунке 4. Графики на рисунках 4а

и 4б отображают, соответственно, зависимость силы тока и напряжения, генерируемых солнечной панелью, а также выходные параметры, преобразуемые контроллером заряда батареи. На выходе контроллера заряда батареи напряжение снижалось до 10 В, в то время как выходной ток, наоборот, повышался до 5 А после применения понижающего преобразователя постоянного тока.

Рисунок 4в представляет собой сравнительные характеристики преобразованных мощностей солнечной панели и контроллера заряда батареи. Выявленное различие величин составило менее 3%. Таким образом, можно утверждать, что проведенное моделирование было успешным, а предложенный понижающий преобразователь постоянного тока вместе с соответствующим алгоритмом проявил эффективность в работе.

Экспериментальные исследования были проведены 28 сентября на территории физико-технического факультета университета КазНУ имени аль-Фараби. Представленная на рисунке 5а экспериментальная установка включает электронные схемы, составляющие контроллер заряда батареи. Каждый компонент функционирует независимо, взаимодействуя между собой. Эти компоненты включают: программируемый контроллер (Arduino), измерители тока и напряжения, понижающий преобразователь постоянного тока, драйвер усиления сигнала для управления силовым транзистором.

Этот комплексный подход к построению экспериментальной установки позволяет исследовать и оптимизировать процессы зарядки батареи с использованием различных параметров и алгоритмов, повышая эффек-

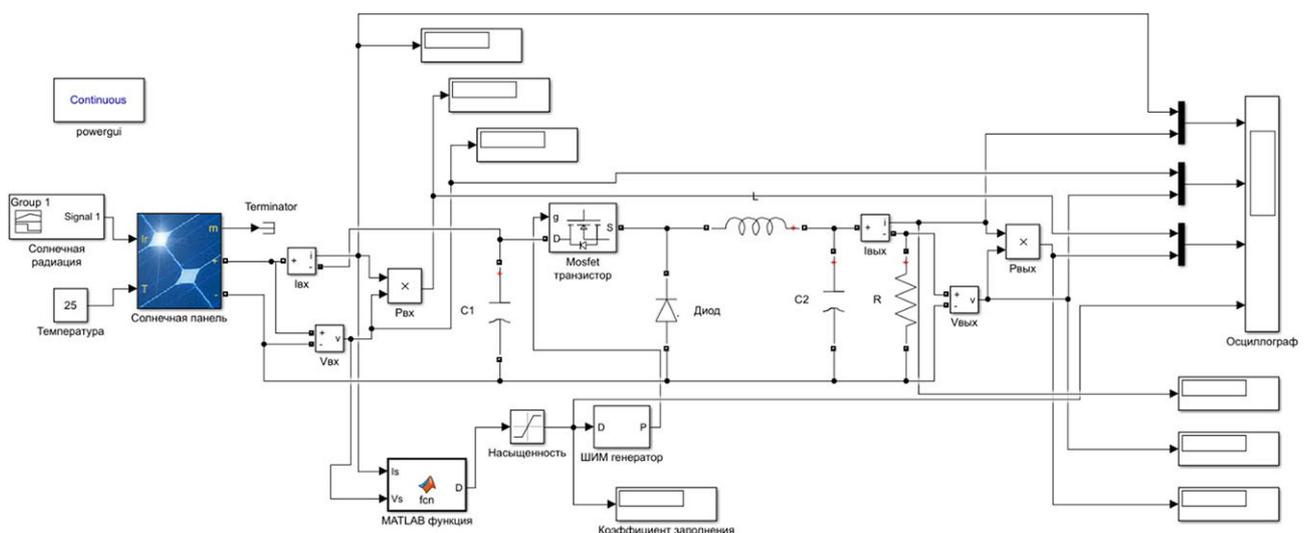


Рисунок 3 – Принципиальная схема аппаратно-программного интерфейса в среде Simulink

Таблица 2 – Параметры воздействия фотоэлектрической панели в различные моменты времени

$t_1 = 0,3 \text{ с}$	$G_1 = 1000 \text{ Вт/м}^2$	$T_1 = 25^\circ\text{C}$
$t_2 = 0,6 \text{ с}$	$G_2 = 700 \text{ Вт/м}^2$	$T_2 = 25^\circ\text{C}$
$t_3 = 0,9 \text{ с}$	$G_3 = 400 \text{ Вт/м}^2$	$T_3 = 25^\circ\text{C}$

тивность системы.

В представленном графике на рисунке 5б зависимости преобразуемых мощностей от времени на входе и выходе разработанного контроллера заряда батареи, сравняемого с коммерческим контроллером, отчетливо проявляется превосходство разработанного устройства, применяющего алгоритм возмущения и наблюдения для отслеживания точки максимальной мощности. Анализ графика позволяет утверждать, что разработанный контроллер демонстрирует более эффективную работу по сравнению с коммерческим аналогом, основанным на применении широтного импульса модуляции (ШИМ).

Выявленные различия в мощности на входе и выходе подтверждают улучшенную производительность разработанного контроллера, ограничиваясь значениями в пределах 4-8%. В то время как у коммерческого контроллера соответствующие показатели

оказались выше, составляя величины от 9% до 21%. Этот факт подчеркивает устойчивость и надежность работы разработанного устройства даже при изменяющихся условиях внешней среды.

Значительное улучшение эффективности разработанного контроллера проявляется особенно в периоды повышенной интенсивности солнечного излучения, причем величина различия в мощностях между контроллерами оказывается наименьшей во время восхода и заката солнца. Таким образом, предложенный контроллер эффективно справляется с динамическими изменениями в условиях окружающей среды, что подтверждает его потенциал для успешного применения в реальных условиях.

Выводы

В данной статье подробно описана структурная схема разработанного контроллера заряда батареи с понижающим преобразователем постоянного тока. Теоретически рассчитаны составляющие электронные элементы устройства. В виртуальной графической программе Matlab Simulink была построена и протестирована модель понижающего преобразователя. Разработан алгоритм, отслеживающий рабочую точку максимальной мощности солнечной панели. Смоделирована полноценная фотоэлектрическая система с контроллером ОТММ.

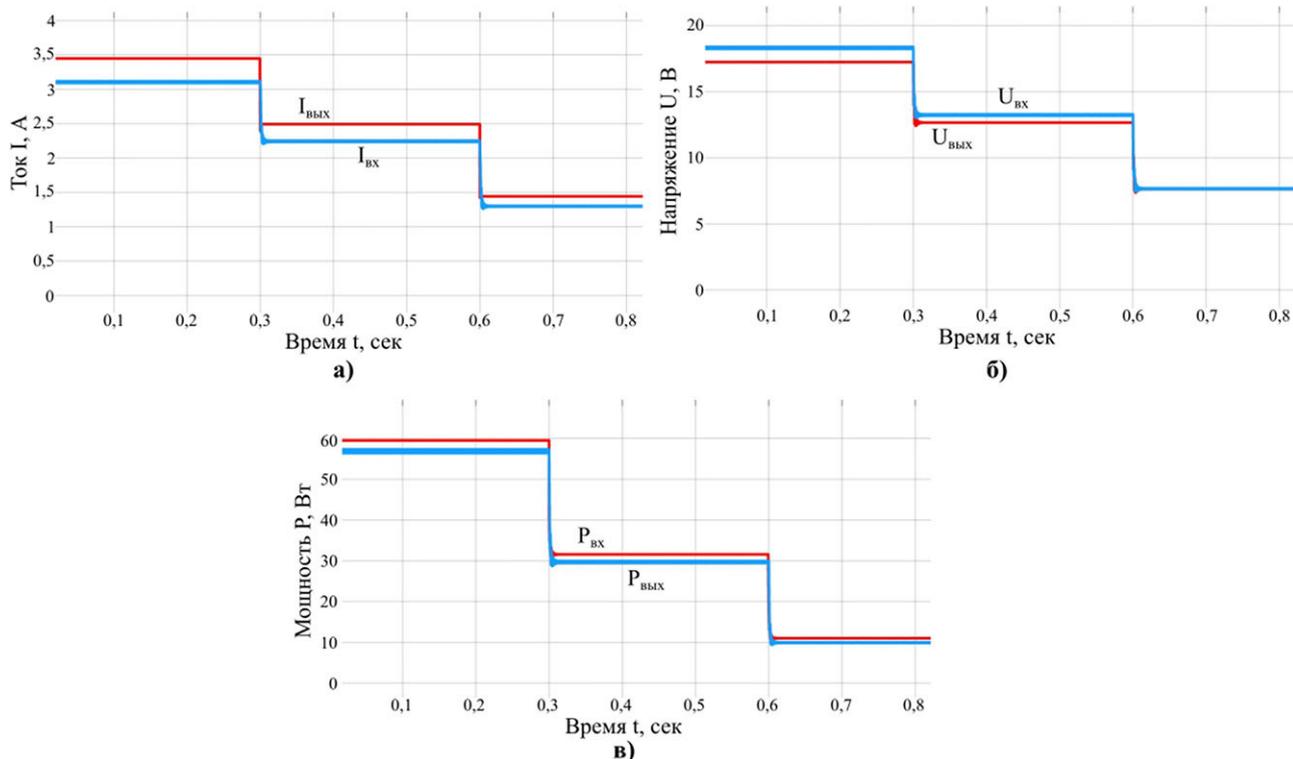
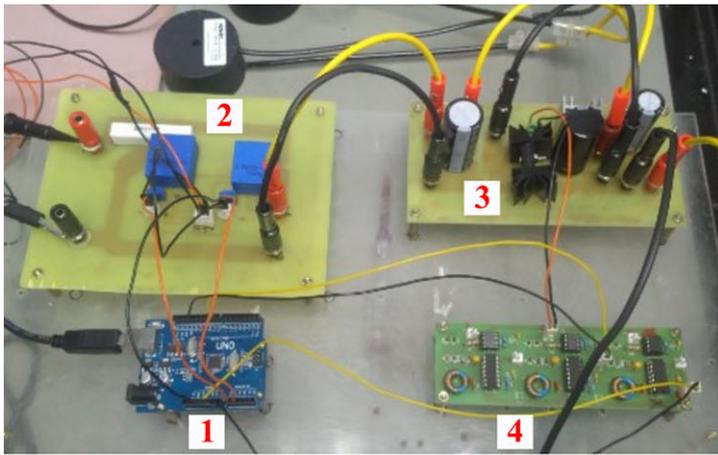
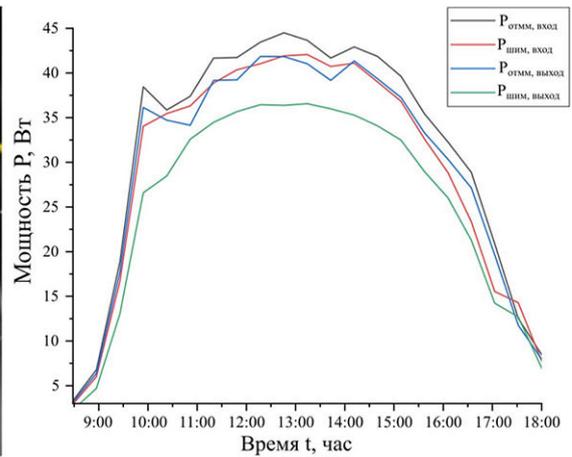


Рисунок 4 – Входные и выходные характеристики моделирования контроллера заряда батареи



а



б

Рисунок 5 – Экспериментальная установка и график зависимости мощности от времени

Для экспериментальной верификации в реальных условиях был разработан контроллер ОТММ. Полученные результаты были сопоставлены с работой коммерческого контроллера ШИМ. В ходе сравнительного анализа выявлено, что разработанный контроллер продемонстрировал улучшение эффективности на 92% по сравнению с 81% эффективностью коммерческого устройства.

Эти результаты подчеркивают значимость и перспективность применения контроллеров, основанных на методе отслеживания рабочей точки максимальной мощности в контексте повышения производительности систем заряда батарей, использующих фотоэлектрические источники энергии. Полученные данные подтверждают эффективность разработанного контроллера

и обосновывают его превосходство в сравнении с традиционными методами управления энергопреобразованием, такими как широтно-импульсная модуляция. Эти результаты имеют важное значение для дальнейшего развития и применения методов отслеживания рабочей точки максимальной мощности в области фотоэлектрических систем и смежных технологий.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке исследовательского проекта AP23487428 Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан и выполнена в Казахском Национальном Университете имени аль-Фараби, что с благодарностью признано авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdulkadir M., Samosir A.S., Yatim A.H.M. Modelling and simulation of maximum power point tracking of photovoltaic system in Simulink model // 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). – IEEE, 2012. – Pp. 325-330.
2. Bahgat A.B.G. et al. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks // Renewable energy. – 2005. – Vol. 30. – No. 8. – Pp. 1257-1268.
3. ESRAM T., Chapman P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques // IEEE Transactions on energy conversion. – 2007. – Vol. 22. – No. 2. – Pp. 439-449.
4. Sher H.A. et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT // IEEE Transactions on sustainable energy. – 2015. – Vol. 6. – No. 4. – Pp. 1426-1434.
5. Ishaque K., Salam Z. A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 19. – Pp. 475-488.

6. Sher H.A. et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT // IEEE Transactions on sustainable energy. – 2015. – Vol. 6. – No. 4. – Pp. 1426-1434.
7. Mellit A. et al. FPGA-based real time implementation of MPPT-controller for photovoltaic systems // Renewable energy. – 2011. – Vol. 36. – No. 5. – Pp. 1652-1661.
8. Karami N., Moubayed N., Outbib R. General review and classification of different MPPT Techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – Pp. 1-18.
9. Sera D. et al. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems // IEEE journal of photovoltaics. – 2013. – Vol. 3. – No. 3. – Pp. 1070-1078.
10. Hwu K.I., Peng T.J. A novel buck-boost converter combining KY and buck converters // IEEE Transactions on power electronics. – 2011. – Vol. 27. – No. 5. – Pp. 2236-2241.

Фотоэлектрлік жүйе үшін максималды қуат нүктесін бақылаушы тиімді контроллер жасау

¹***ҚҰТТЫБАЙ Нұржігіт Бақытұлы**, PhD, доцент м.а., nurjigit.10.93@gmail.com,
¹**ЕСЕН Бегім Ержанұлы**, магистрант, begim.yesen@gmail.com,
¹**ҚОШҚАРБАЙ Нұрсұлтан Жалғасұлы**, докторант, koshkarbay.nursultan@gmail.com,
¹**ЖОЛАМАНОВ Батырбек Нұрыллаұлы**, докторант, batyrbek149@gmail.com,
¹**БОЛАТБЕК Асхат Бауыржанұлы**, докторант, bolatbekaskhat98@gmail.com,
¹«Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті» КеАҚ, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан,
*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Күн панельдерінің максималды қуат нүктесін бақылау (МҚНБ) технологиясымен жабдықталған батарея контроллерін қолдана отырып, автономды фотоэлектрлік жүйелердің жұмысын жақсарту әдісі келтірілген. Бүгінгі таңда МҚНБ контроллері оңтайлы қуат нүктесін табу және таңдау арқылы күн панельдерінің тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ететін технология болып табылады. Зерттеудің мақсаты – күн батареялары үшін максималды қуат нүктесін бақылау әдісіне негізделген тиімділігі жоғары батарея контроллерін әзірлеу және сынақтан өткізу. Ұсынылған әдіс өршіту және бақылау алгоритмін қолданады, сонымен қатар ток пен кернеудің шығыс сипаттамаларына негізделе отырып максималды қуат нүктесін қадағалайды. Зерттеу барысында төмендеткіш тұрақты ток түрлендіргіші қолданылды. Ұсынылған әдіс моделі Matlab Simulink бағдарламалық ортасында жүзеге асырылды және жұмыс алгоритмінің тиімділігі бағаланды. Сонымен қатар, осы модель негізінде нақты жағдайларда сынақтан өткен МҚНБ контроллері жасалды. Ұсынылған әдістің сенімділігін бағалау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде коммерциялық батарея заряды контроллерімен салыстырмалы талдау арқылы жасалған жүйенің тиімділігі анықталды.

Кілт сөздер: батарея контроллері, күн панелі, тұрақты ток түрлендіргіші, радиация, батарея, сенсорлар.

Development of an Efficient Maximum Power Point Tracking Controller for a Photovoltaic System

¹***KUTTYBAY Nurzhigit**, PhD, Acting Assistant Professor, nurjigit.10.93@gmail.com,
¹**YESSEN Begim**, Master's Student, begim.yesen@gmail.com,
¹**KOSHKARBAY Nursultan**, Doctoral Student, koshkarbay.nursultan@gmail.com,
¹**ZHOLAMANOV Batyrbek**, Doctoral Student, batyrbek149@gmail.com,
¹**BOLATBEK Askhat**, Doctoral Student, bolatbekaskhat98@gmail.com,
¹NPJSC «Al-Farabi Kazakh National University», Al-Farabi Avenue, 71, Almaty, Kazakhstan,
*corresponding author.

Abstract. A method is presented to improve the performance of off-grid photovoltaic systems using a battery charge controller equipped with solar panel maximum power point tracking (MPPT) technology. Today, the MPPT controller is an effective technology that ensures the ideal functioning of solar panels by searching and selecting the optimal power point. The purpose of the study is to develop and evaluate the performance of a battery charge controller for solar panels based on the maximum power point tracking method. The proposed method uses a perturbation and observation algorithm and tracks the maximum power point based on the current and voltage output characteristics. A DC/DC buck converter was used in the study. The model of the proposed method was implemented in the Matlab Simulink software environment, and the efficiency of the operating algorithm was assessed. In addition, based on this model, an MPPT controller was developed, which was tested in real conditions. The reliability of the proposed method was also assessed. As a result of the study, the effectiveness of the developed system was revealed through a comparative analysis with a commercial battery charge controller.

Keywords: battery charge controller, solar panel, DC/DC converter, radiation, battery, sensors.

REFERENCES

1. Abdulkadir M., Samosir A.S., Yatim A.H.M. Modelling and simulation of maximum power point tracking of photovoltaic system in Simulink model // 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). – IEEE, 2012. – Pp. 325-330.
2. Bahgat A.B.G. et al. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks // Renewable energy. – 2005. – Vol. 30. – No. 8. – Pp. 1257-1268.
3. ESRAM T., Chapman P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques // IEEE Transactions on energy conversion. – 2007. – Vol. 22. – No. 2. – Pp. 439-449.
4. Sher H.A. et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT // IEEE Transactions on sustainable energy. – 2015. – Vol. 6. – No. 4. – Pp. 1426-1434.
5. Ishaque K., Salam Z. A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 19. – Pp. 475-488.
6. Sher H.A. et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT // IEEE Transactions on sustainable energy. – 2015. – Vol. 6. – No. 4. – Pp. 1426-1434.
7. Mellit A. et al. FPGA-based real time implementation of MPPT-controller for photovoltaic systems // Renewable energy. – 2011. – Vol. 36. – No. 5. – Pp. 1652-1661.
8. Karami N., Moubayed N., Outbib R. General review and classification of different MPPT Techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – Pp. 1-18.
9. Sera D. et al. On the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems // IEEE journal of photovoltaics. – 2013. – Vol. 3. – No. 3. – Pp. 1070-1078.
10. Hwu K.I., Peng T.J. A novel buck-boost converter combining KY and buck converters // IEEE Transactions on power electronics. – 2011. – Vol. 27. – No. 5. – Pp. 2236-2241.