



Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при параллельной и смешанной коммутации

Рецензия эксперта на статью получена 06.08.2018 [Expert review on the article was received on August 06, 2018].

В настоящее время в мире всё большее распространение получают энергоустановки, работающие от возобновляемых источников энергии, среди которых одними из наиболее перспективных представляются установки, использующие энергию солнечного излучения. Преимуществами этого источника энергии являются экологичность, что позволяет использовать её практически в любых масштабах, не принося ущерба окружающей среде, а также доступность почти в каждой точке нашей планеты, различаясь по плотности излучения не более чем в два раза [1]. В Российской Федерации достаточно много районов, где среднегодовой приход солнечной энергии составляет 4–5 кВт·ч на 1 м² в сутки, этот показатель является довольно высоким и соизмеримым с показателями в странах-лидерах по внедрению солнечных энергетических систем. Всё это говорит о целесообразности развития солнечной энергетики в нашей стране. К тому же модульная конструкция фотоэлектрических установок позволяет проектировать их практически на любую мощность, что делает эти

установки универсальным и надёжным решением, находящим широкое применение, как в промышленном производстве электроэнергии, так и в небольших системах энергообеспечения [2, 3].

Однако, несмотря на все свои достоинства, энергоустановки, работающие от солнечной энергии, имеют некоторые особенности, одним из которых является нелинейное внутреннее сопротивление фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Это явление особенно негативно себя проявляет в условиях неравномерного освещения, затенения или загрязнения ФЭП, снижая их и без того невысокую эффективность. Для достижения требуемой электрической мощности в солнечных энергоустановках применяют последовательную, параллельную и смешанную коммутации ФЭП. При каждом варианте коммутации снижение эффективности происходит по-разному.

В данной статье рассмотрены особенности работы при параллельной и смешанной коммутации ФЭП в условиях равномерной и неравномерной освещённости [4–6].

УДК 620.91

Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при параллельной и смешанной коммутации

П. Н. Кузнецов, старший преподаватель кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети», Институт ядерной энергии и промышленности, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (СевГУ); **Л. Ю. Юфев**, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий отделом возобновляемой энергетики, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Для достижения максимальной эффективности работы фотоэлектрических установок необходимо учитывать все особенности их работы. В статье рассматриваются особенности работы фотоэлектрических преобразователей при параллельной и смешанной коммутации в условиях равномерной и неравномерной освещённости, возникающей вследствие их частичного затенения или загрязнения. Приведено теоретическое объяснение причин снижения энергоэффективности батарей фотоэлектрических преобразователей при такой коммутации. Представлены экспериментальные подтверждения этого явления на примере установок с использованием промышленных фотоэлектрических панелей KV-260M и монокристаллических преобразователей производства ПАО «Квэзар». Результаты проведенного исследования будут полезны при проектировании энергетических установок с использованием фотоэлектрических преобразователей, особенно там, где имеет место частичное затенение.

Ключевые слова: фотоэлектричество, параллельная, смешанная, коммутация, затенение, исследование.

UDC 620.91

Increase the efficiency of photoelectric converters with parallel and mixed switching

P. N. Kuznetsov, Senior Lecturer, "Renewable Energy Sources and Electrical Systems and Networks", Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University; **L. Yu. Yuferev**, Doctor of Engineering Science, Chief Researcher, Head of Renewable Energy Department, Federal State Scientific "Agroengineering Center VIM"

The article deals with practical application of photovoltaic cells in a variety of connecting options. For maximum efficiency of photovoltaic installations is necessary to take account of all the peculiarities of their work. As the title implies the article describes the peculiarities of photovoltaic cells in parallel and mixed commutation in uniform and non-uniform solar radiation, arising as a result of partial shading or soiling. It is given the theoretical explanation of the causes of the decrease of energy efficiency photovoltaic cells with the above commutation. It is represented experimental confirmation of this fact by the example of industrial plants using photovoltaic panels KV-260M and the single-crystal transformers produced by "Kvazar", PJSC. Results of the research will be useful in the developing and design of photovoltaic installations, especially those with probable partial shading.

Keywords: photovoltaic, parallel, mixed, connection, shading, research.

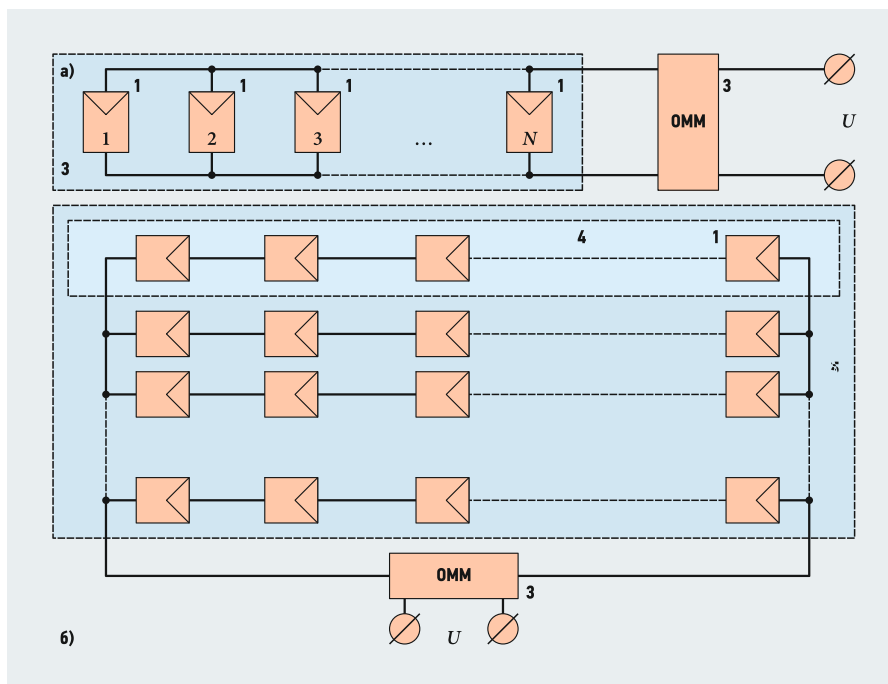


Рис. 1. Фотоэлектрическая установка (а — с параллельной коммутацией ФЭП, б — со смешанной коммутацией ФЭП; 1 — ФЭП; 2 — батарея ФЭП; 3 — устройство поиска точки максимальной мощности и оптимизации выходной мощности; 4 — группа последовательно соединённых ФЭП)

Исследование этого вопроса очень актуально в связи с тем, что в настоящее время множество работающих солнечных установок, в которых используются такие виды коммутации, спроектированы без учёта некоторых особенностей работы в условиях частичного затенения, что приводит к значительному снижению их эффективности [7].

Параллельная коммутация ФЭП в батарею представлена на рис. 1а, а смешанная коммутация — на рис. 1б.

Вольтамперную характеристику равномерно освещённой батареи для первого квадранта можно описать уравнением, выведенным из уравнения Шокли, с учётом того, что ток батареи будет равен сумме токов каждого ФЭП, а напряжение будет равно напряжению каждого ФЭП:

$$I = n_{\text{пр}} \left[I_{\text{ф}} - I_0 \left\{ \exp \left(\exp \left[\frac{q(U + IR_{\text{п}})}{AkT} \right] \right) - 1 \right\} - \frac{U + IR_{\text{п}}}{R_{\text{ш}}} \right], \quad (1)$$

где $n_{\text{пр}}$ — количество параллельно соединённых фотоэлементов в батарее ФЭП; $I_{\text{ф}}$ — фототок, А; I_0 — обратный ток насыщения; q — заряд электрона, $q = 1,602 \times 10^{-19}$ Кл; U — напряжение батареи ФЭП, В; $R_{\text{п}}$ — последовательное сопротивление ФЭП; $R_{\text{ш}}$ — шунтирующее сопротивление ФЭП; k — постоянная Больцмана, $k = 1,381 \times 10^{-23}$ Дж/К; T — температура фотоэлемента, К; $n_{\text{пр}}$ — количество последовательно соединённых фотоэлементов в батарее ФЭП; A — коэффициент идеальности фотоэлемента, зависящий от толщины зоны р-п-переходов и материала.

Максимальная мощность батареи будет определяться уравнением:

$$P_{\text{пр}} = U_{\beta \text{max}} I_{\beta \text{max}} = U_{\beta \text{max}} \sum_{i=1}^n (I_{\beta i}), \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}}$ — максимальная мощность батареи ФЭП с параллельной коммутацией, Вт; $U_{\beta \text{max}}$ — напряжение батареи в точке максимальной мощности, В; $I_{\beta \text{max}}$ — ток батареи в точке максимальной мощности, А; I_i — ток i -го ФЭП, А.

Можно предположить, что при неравномерном освещении ФЭП максимальная мощность батареи уменьшится на величину снижения максимальной мощности отдельных ФЭП вследствие их затенения. Однако это происходит несколько иначе из-за того, что напряжения ФЭП в точках максимальной мощности (ТММ) не одинаковы при различных освещённостях, как это показано на рис. 2.

Разницу напряжений между точками максимальной мощности ФЭП с различ-

ной освещённостью можно найти из уравнения (3). Из-за этой разницы напряжений отбор электроэнергии от батареи не представляется возможным в точке максимальной мощности каждого фотоэлектрического преобразователя:

$$\Delta U = U_{\beta \text{max}1} - U_{\beta \text{max}2} = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{(I_{\text{ф}1} - I_{\text{max}1}) I_{02}}{(I_{\text{ф}2} - I_{\text{max}2}) I_{01}} \right] - R_{\text{п}} (I_{\text{max}1} + I_{\text{max}2}), \quad (3)$$

где $U_{\beta \text{max}1}$ и $U_{\beta \text{max}2}$ — значения напряжений ФЭП в точках максимальной мощности, В; $I_{\beta \text{max}1}$ и $I_{\beta \text{max}2}$ — значения токов ФЭП в точках максимальной мощности, А; $I_{\text{ф}1}$ и $I_{\text{ф}2}$ — фототок ФЭП1 и ФЭП2, А; $I_{\text{max}1}$ и $I_{\text{max}2}$ — токи нагрузки ФЭП1 и ФЭП2 в ТММ, А; I_{01} и I_{02} — обратные токи насыщения ФЭП1 и ФЭП2, А.

Анализ характеристики такой батареи показывает, что напряжение в точке абсолютного максимума будет соответствовать напряжению в точке максимальной мощности затенённого элемента в диапазоне расхождений интенсивностей излучения от 10 до 100 %.

Из этого следует, что в таком случае мощность элемента с большим значением освещённости будет ограничена менее освещённым элементом. Потери мощности при этом составят:

$$P_{\text{н}} = P_{\text{max}1} - P_1 = I_{\text{max}1} U_{\text{max}1} - I_1 U_{\text{max}2} = \left[I_{\text{ф}1} - I_{01} \left\{ \exp \left(\exp \left[\frac{q(U_{\text{max}1} + I_{\text{max}1} R_{\text{п}})}{AkT} \right] \right) - 1 \right\} \right] U_{\text{max}1} - \left[I_{\text{ф}1} - I_{01} \left\{ \exp \left(\exp \left[\frac{q[(U_{\text{max}1} - \Delta U) + I_{\text{max}1} R_{\text{п}}]}{AkT} \right] \right) - 1 \right\} \right] U_{\text{max}2}, \quad (4)$$

где $P_{\text{max}1}$ — мощность ФЭП1 в ТММ, Вт; P_1 — мощность ФЭП1 при параллельном соединении с ФЭП2, Вт; I_1 — ток ФЭП при параллельном соединении с ФЭП2, А.

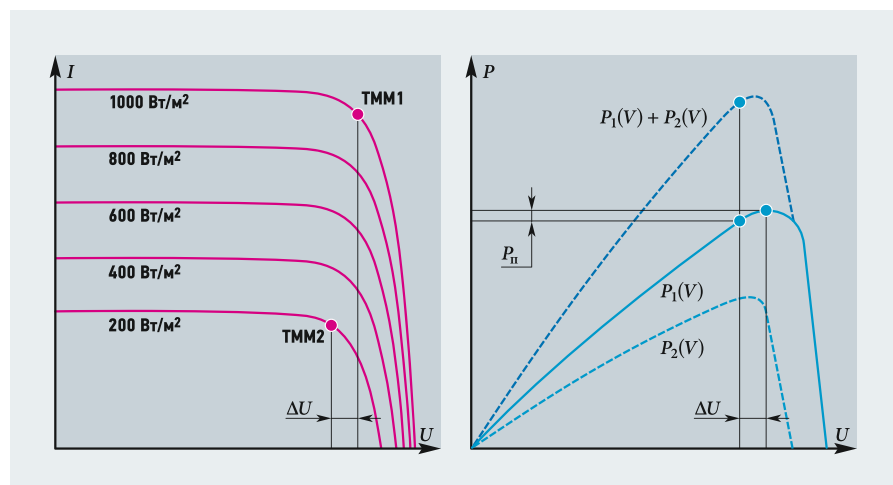


Рис. 2. Вольтамперные характеристики ФЭП при разной освещённости

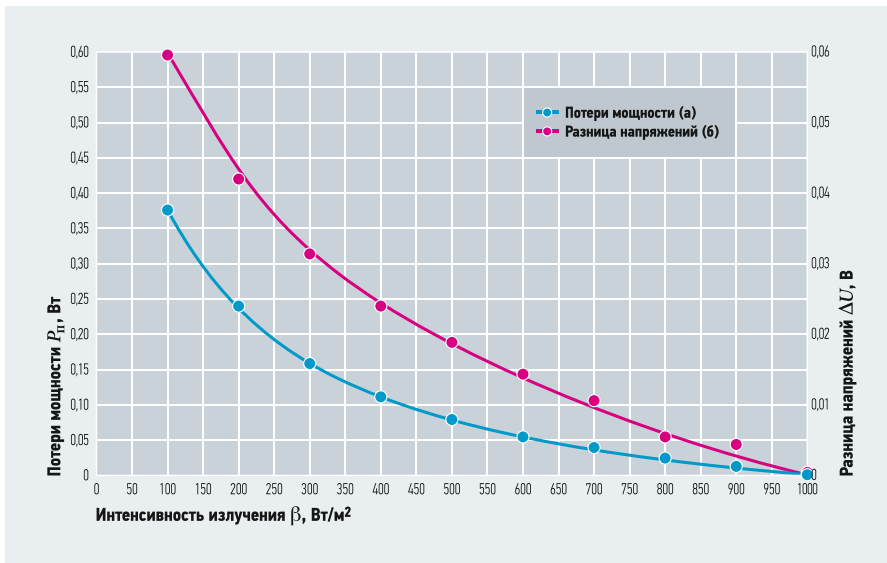


Рис. 3. Графики зависимости потерь мощности (а) и разницы напряжений (б) батареи от интенсивности излучения (точками показаны результаты экспериментальных измерений)

Для получения численных данных о значениях потерь электрической энергии батареи и значениях напряжений рассогласования, приводящих к этим потерям, в зависимости от интенсивности излучения на одном из ФЭП и стандартных условиях на другом, было выполнено математическое моделирование, используя приведённые формулы (1–4). В качестве объекта моделирования была использована батарея, состоящая из двух параллельно соединённых ФЭП производства ПАО «Квазар», серия К6М. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Из графиков видно, что в таком случае ФЭП, работающий при стандартных условиях, теряет до 7,4% мощности в зависимости от интенсивности излучения на затенённом солнечном элементе, что может быть существенным при смешанной коммутации, как будет показано ниже.

Для экспериментального подтверждения этих явлений в лаборатории «Возобновляемые источники энергии» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» была собрана установка, состоящая из батареи ФЭП, аналогичной использованной при моделировании, измерительных приборов и нагрузки.

Измерения напряжений производились цифровыми мультиметрами UNI-T UT39B, имеющими погрешность $\pm 0,5\% + 1$ ед. счёта в диапазоне от 200 мВ до 1000 В. Значения токов измерялись мультиметрами APPA 503 (№49266-12 в Госреестр СИ до 17 февраля 2022 года) с погрешностью измерений постоянного тока $\pm 0,2\% + 40$ ед. счёта в диапазоне от 40 мА до 10 А. Измерение интенсивности излучения производилось люксметрами по методу светового эквивалента, используя люксметры UT381 и Ю116.



Результаты эксперимента подтверждают, что батарея, состоящая из параллельно соединённых ФЭП, имеющих разную освещённость, имеет максимальную мощность меньшую, чем сумма максимальных мощностей каждой ФЭП по отдельности. Однако в установках небольшой мощности, работающих в условиях неравномерного освещения длительное время (например, при использовании с плоскими солнечными концентраторами), параллельное соединение не оказывает столь высокого падения энерговыработки по сравнению с последовательным соединением.

Более существенное влияние неравномерного освещения на энерговыработку солнечной установки происходит при смешанной коммутации ФЭП.

Из графиков видно, что в таком случае ФЭП, работающий при стандартных условиях, теряет до 7,4% мощности в зависимости от интенсивности излучения на затенённом солнечном элементе, что может быть существенным при смешанной коммутации, как будет показано ниже

При такой коммутации ток батареи складывается из токов каждой группы последовательно соединённых ФЭП:

$$I = \sum_{i=1}^n (I_i),$$

а напряжение будет равно напряжению каждой такой группы, которое, в свою очередь, будет складываться из напряжений каждого элемента, входящего в этот массив:

$$U = \sum_{i=1}^n (U_i).$$

Итак, вольтамперная характеристика такой батареи при равномерном освещении будет описываться уравнением:

$$I = n_{\text{пр}} \left[I_{\text{ф}} - I_0 \left\{ \exp \left(\exp \left[\frac{q(U + IR_{\text{ш}})}{n_{\text{пс}}(AkT)} \right] \right) - 1 \right\} - \frac{U + IR_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} \right], \quad (5)$$

где $n_{\text{пр}}$ — количество параллельно соединённых групп ФЭП; $n_{\text{пс}}$ — количество последовательно соединённых ФЭП.

При неравномерном освещении батареи со смешанной коммутацией ФЭП снижение энерговыработки связано с теми же причинами, которые возникают при последовательной и параллельной коммутации, но с некоторыми существенными особенностями.

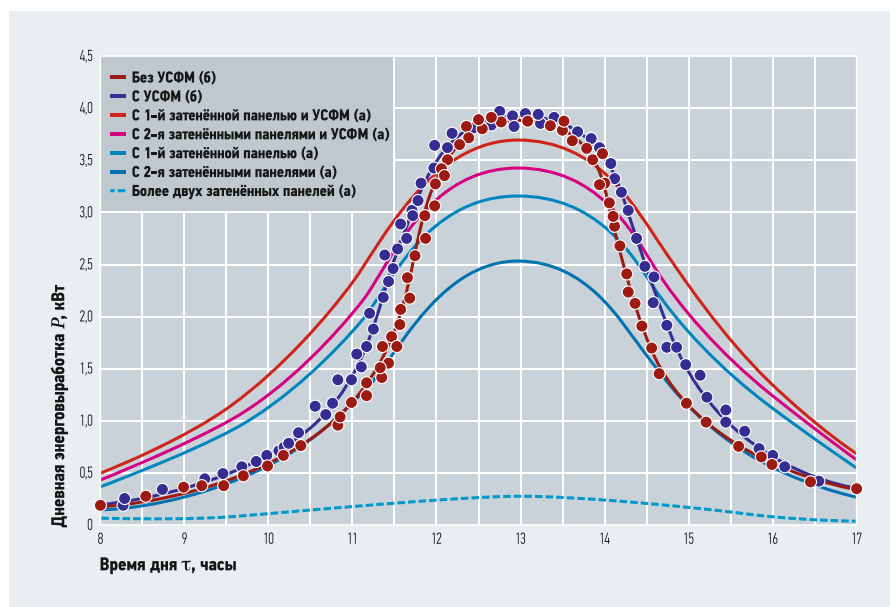


Рис. 4. Графики дневной энергосыработки группы ФЭП (а — при неравномерном затенении, б — при равномерном затенении)

Эти особенности связаны с тем, что при изменении ТММ любой из параллельно соединённых групп ФЭП становится невозможным отбор максимальной мощности от каждой группы из-за разницы напряжений ΔU , приводящей к снижению мощности батареи на величину, превышающую величину снижения максимальной мощности отдельных групп, вследствие их затенения. При этом снижение мощности происходит по-разному, в зависимости от характера затенения: равномерного (все фотоэлектрические панели параллельной группы работают в условиях частичного или полного затенения) и неравномерного (часть фотоэлектрических панелей параллельной группы работают в условиях частичного или полного затенения).

В случае равномерного затенения снижение эффективности батареи происходит по тем же причинам, что и при параллельной коммутации. Значения потери энергии и напряжения рассогласования также будут рассчитываться аналогично с учётом того, что вместо уравнения (1) будет использоваться уравнение (5). Однако при неравномерном затенении эти значения будут определяться иначе. Это происходит вследствие того, что причиной снижения напряжения в ТММ затенённой группы в этом случае является шунтирование части ФЭП, имеющих затенение, шунтирующими диодами, установленными в фотоэлектрические панели. Таким образом, напряжение рассогласования будет определяться суммой напряжений шунтированной части ФЭП U_3 и падением напряжения на шунтирующих диодах U_d .

Для решения этой проблемы П.Н. Кузнецовым и А.А. Борисовым был изобретён способ отбора электрической энергии

от батарей фотоэлектрических преобразователей и изготовлено «Устройство согласование массивов фотоэлектрических модулей» (УСФМ), реализующее данный способ. Использование УСФМ позволяет отбирать мощность от батарей, равную сумме максимальных мощностей отдельных параллельно соединённых групп, как это обосновано в [9–11].

В случае равномерного затенения снижение эффективности батареи происходит по тем же причинам, что и при параллельной коммутации. Значения потери энергии и напряжения рассогласования будут рассчитываться аналогично [вместо уравнения (1) используется (5)]. Однако при неравномерном затенении эти значения будут определяться иначе

Важной особенностью данного способа является то, что для согласования массивов не требуется преобразование всей вырабатываемой ими электрической энергии, в отличие от зарубежных аналогов, а лишь её небольшой части, определяемой уровнем рассогласованности по напряжению в ТММ.

Для получения численных данных о значениях потерь энергии фотоэлектрических батарей от рассогласованности по напряжению параллельных групп с использованием УСФМ и без него, было проведено экспериментальное исследование на действующей солнечной электростанции города Севастополя (ООО «С. Энерджи-Севастополь») установленной мощностью 2,995 МВт.

На рис. 4а приведён график зависимости дневной энергосыработки параллельной группы ФЭП, состоящей из 18-ти последовательно соединённых фотоэлектрических панелей KV-260М в зависимости от количества частично затенённых панелей с использованием УСФМ и без него, а на рис. 4б приведён график энергосыработки при равномерном затенении группы также с использованием УСФМ и без него.

Результаты исследования показали, что при частичном затенении двух панелей из 18-ти использование УСФМ позволяет увеличить суточную энергосыработку массива на 43,7%, а в случае затенения одного — на 19,7%, а при частичном затенении более двух панелей группа практически не способна передавать электрическую энергию без УСФМ из-за существенного рассогласования по напряжению в ТММ. Также из графиков видно, что в случае равномерного затенения использование УСФМ позволило увеличить среднесуточную выработку электроэнергии на 8%, что соотносится с результатами, полученными при моделировании. Полученные результаты были подтверждены актом внедрения.

Анализ результатов работы УСФМ на Севастопольской солнечной электростанции с октября по март показал, что использование устройства согласования позволяет увеличить суточную энергосыработку группы ФЭП, имеющую частичное затенение, до 70% в зимнее время года. ●

1. Бестужев-Лада И.В. Альтернативная цивилизация. — М.: Влалос, 1998. 352 с.
2. Чуйков Р. Обзор отрасли и перспективы развития солнечной энергетики в России // Альтернативный киловатт, 2010. №2.
3. Стребков Д.С. Технологии крупномасштабной солнечной энергетики [Электр. текст] // Статьи о солнечной энергетике ГНУ ВИЭСХ. Апрель 2011.
4. Юферев Л.Ю. Преобразователь напряжения для концентраторной установки с параллельным соединением солнечных элементов // Инновации в сельском хозяйстве, 2016. №5. С. 160–164.
5. Юферев Л.Ю. Концентраторная установка с параллельным соединением солнечных элементов // Инновации в сельском хозяйстве, 2016. №1. С. 252–254.
6. Кузнецов П.Н., Юферев Л.Ю. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении // Вестник ВИЭСХ, 2017. №1. С. 90–97.
7. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 351 с.
8. Moyer E. Solar Photovoltaics EJM. GEOS24705. Chicago. Department of the Geophysical Sciences. 2011.
9. Кузнецов П.Н., Сафонов В.А. Повышение эффективности работы фотоэлектрической станции // Энергобезопасность и энергосбережение, 2016. №3. С. 26–30.
10. Кузнецов П.Н., Юферев Л.Ю. Применение фотоэлектрических водоподъёмных установок для орошения полей на территории Крыма // Вестник ВИЭСХ, 2018. №1. С. 83–88.
11. Патент РФ №2634590, МПК H02J 7/35, G05F 1/67. Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователей / Кузнецов П.Н., Борисов А.А. Заявл. 26.09.2016; опубл. 01.11.2017. Бюл. №31.

Increase the efficiency of photoelectric converters with parallel and mixed switching. Pp. 78–81.

P.N. Kuznetsov, Senior Lecturer, “Renewable Energy Sources and Electrical Systems and Networks”, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University (Sevastopol city); **L. Yu. Yuferev**, Doctor of Engineering Science, Chief Researcher, Head of Renewable Energy Department, Federal State Scientific “Agroengineering Center VIM” (Moscow city)

1. Bestuzhev-Lada I.V. *Alternativnaja civilizacija* [Alternative civilization]. Moscow. *Vlados* [“Vlados” Publishers]. 1998. 352 p.
2. Chujkov R. *Obzor otrasli i perspektivy razvitiya solnechnoj jenergetiki v Rossii* [Overview of the industry and prospects for the development of solar energy in Russia]. *Al'ternativnyj kilovatt* [“Alternate kilowatt” Magazine]. 2010. No. 2.
3. Strebkov D.S. *Tehnologii krupnomasshtabnoj solnechnoj jenergetiki* [Technologies of large-scale solar energy]. *Stat'i o solnechnoj jenergetike GNU VIJeSH* [Articles on solar power of Federal State Scientific “Agroengineering Center VIM”]. April 2011.
4. Juferev L.Ju. *Preobrazovatel' naprjazhenija dlja koncentratornoj ustanovki s paralel'nym soedineniem solnechnyh jelementov* [The voltage converter for the concentrator with a parallel connection of solar cells]. *Innovacii v sel'skom hozjajstve* [“Innovations in agriculture” Magazine]. 2016. No. 5. Pp. 160–164.
5. Juferev L.Ju. *Koncentratornaja ustanovka s paralel'nym soedineniem solnechnyh jelementov* [The concentrator with parallel connection of solar cells]. *Innovacii v sel'skom hozjajstve* [“Innovations in agriculture” Magazine]. 2016. No. 1. Pp. 252–254.
6. Kuznecov P.N., Juferev L.Ju. *Povyshenie jeffektivnosti raboty fotoelektricheskikh preobrazovatelej pri posledovatel'nom podkljuchenii* [Increase the efficiency of the photoelectric converters at consecutive connection]. *Vestnik VIJeSH* [Papers of Federal State Scientific “Agroengineering Center VIM”]. 2017. No. 1. Pp. 90–97.
7. Raushenbah G. *Spravochnik po proektirovaniju solnechnyh batarej* [Reference book on the design of solar batteries]. Moscow. *Jenergoatomizdat* [“Energoatomizdat” Publishers — Nuclear Energy Publishing House]. 1983. 351 p.
8. Moyer E. *Solar Photovoltaics* EJM. GEOS24705. Chicago. Department of the Geophysical Sciences. 2011.
9. Kuznecov P.N., Safonov V.A. *Povyshenie jeffektivnosti raboty fotoelektricheskoi stancii* [Increase the efficiency of the photovoltaic station]. *Jenergobezopasnost' i jenergobezbezhenie* [“Energy security and energy saving” Magazine]. 2016. No. 3. Pp. 26–30.
10. Kuznecov P.N., Juferev L.Ju. *Primenenie fotoelektricheskikh vodopod'emnykh ustanovok dlja oroshenija polej na territorii Kryma* [An application of photovoltaic water-lifting installations for irrigation of fields in the territory of the Crimea]. *Vestnik VIJeSH* [Papers of Federal State Scientific “Agroengineering Center VIM”]. 2018. No. 1. Pp. 83–88.
11. Patent of Russia No. 2634590, IPC H02J 7/35, G05F 1/67. *Sposob otbora jelektricheskoi jenergii ot batarej fotoelektricheskikh preobrazovatelej* [A method for selecting electrical energy from photovoltaic converter batteries]. Kuznecov P.N., Borisov A.A. Decl. September 26, 2016; publ. November 01, 2017. Bull. No. 31.