

УДК 621.3

UDC 621.3

05.00.00 Технические науки

Engineering

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ:  
ПЕРСПЕКТИВЫ, ДОСТОИНСТВА,  
НЕДОСТАТКИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ****PHOTOVOLTAIC PLANTS: PROSPECTS,  
ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND THEIR  
CHARACTERISTICS**

Усков Антон Евгеньевич  
к.т.н., доцент  
9184349285@mail.ru  
SPIN-код: 7461-9490

Uskov Anton Evgenievich  
Cand.Tech.Sci., associate Professor  
9184349285@mail.ru  
SPIN-code: 7461-9490

Дайбова Любовь Анатольевна  
к.т.н., доцент  
daibova\_la@mail.ru  
SPIN-код: 6214-0244

Daibova Lyubov Anatolievna  
Cand.Tech.Sci., associate Professor  
daibova\_la@mail.ru  
SPIN-code: 6214-0244

Кравченко Николай Александрович  
магистр

Kravchenko Nikolai Aleksandrovich  
master

Самойлов Андрей Николаевич  
магистр  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Samoilov Andrey Nikolaevich  
master  
*Kuban state agrarian University, Krasnodar, Russia*

Анализ научно-технической литературы показал, перспективным направлением в вопросах энергосбережения и повышения эффективности электроснабжения потребителей отдалённых от внешних сетей в России, является применение солнечных фотоэлектрических станций. Уровень солнечной радиации на территории России изменяется в широких пределах от 810 кВт ч/м<sup>2</sup> в год в отдалённых северных районах до 1400 кВт ч/м<sup>2</sup> в год в южных районах. Раскрыты основные их достоинства и недостатки солнечных фотоэлектрических станций, а также назначение, основные характеристики, особенности выбора и работы инверторов и аккумуляторных батарей. Приведена обобщённая структурная схема трёх типов солнечных фотоэлектрических станций: автономных; резервных; работающих с сетью. Рассмотрены особенности их работы. Для повышения надёжности работы солнечных электростанций необходимо их конструировать по модульному принципу. Модульное агрегатирование необходимо также применить для автономных инверторов, где в качестве функциональных модульных элементов представить входные и выходные фильтры, силовую электронную схему и систему стабилизации напряжения и защиты. Значительно повысить показатели надёжности автономных инверторов и солнечных фотоэлектрических установок в комплексе можно за счёт применения в их конструкции однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем. Рассмотренные в статье достоинства и недостатки, особенности работы солнечных

Analysis of scientific literature has shown a promising direction in energy saving and in increasing of efficiency of power supplies remote from external networks in Russia is the application of solar photovoltaic power plants. The level of solar radiation on the territory of Russia varies widely from 810 kWh/m<sup>2</sup> per year in remote Northern areas to 1,400 kWh/m<sup>2</sup> per year in southern areas. We have revealed their main advantages and disadvantages of solar photovoltaic power plants, as well as the purpose, basic features, features selection and operation of inverters and batteries. We have also given a generalized block diagram of three types of solar photovoltaic power plants: autonomous, standby, network. The peculiarities of their work have been presented. To improve the reliability of operation of solar power plants we need to design them according to the modular principle. Modular aggregation has to be applied for stand-alone inverters, where the input and output filters, power electronic circuit and system voltage regulation and protection represent the functional module elements. It is possible to increase significantly the reliability of autonomous inverters and solar PV systems in the complex, using one-phase and three-phase transformers with rotating magnetic field in their design. The advantages and the disadvantages, the peculiarities of the solar PV plants discussed in the article will allow to develop their structural and circuit designs with improved maintenance characteristics in the future

фотоэлектрических станций позволят в перспективе разрабатывать их структурно-схемные решения с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками

Ключевые слова: СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ, ИНВЕРТОРЫ

Keywords: SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS, SOLAR PHOTOVOLTAIC INSTALLATION, SOLAR PANELS, INVERTERS

**Doi: 10.21515/1990-4665-124-025**

Российская Федерация расположена между 41 и 82 градусами северной широты, где уровень солнечной радиации изменяется в широких пределах от 810 кВт.ч/м<sup>2</sup> в год в отдаленных северных районах до 1400 кВт.ч/м<sup>2</sup> в год в южных районах.

Высокий теоретический (валовый) потенциал солнечной энергии на юго-западе России (Северный Кавказ, район Темного и Каспийского морей) и в Южной Сибири, а также на Дальнем Востоке.

По данным Института Энергетической стратегии, теоретический потенциал солнечной энергетики в РФ составляет более 2,3 млрд тонн условного топлива, а экономический потенциал 12,5 млн. т.у.т. Потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию РФ в течение 3-х дней, превосходит энергию годового производства электроэнергии в нашей стране.

В 2008 – 2010 годы мир прошел пик добычи органического топлива. С этого времени добыча углеводородного сырья постепенно уменьшается (до 7% в год). Поэтому с 2020 – 2025 годов нефть и газ уже не будут массово использоваться как топливо, и человечество вынуждено будет переходить полностью на нетрадиционные, в том числе возобновляемые, источники энергии.

По разным прогнозам, процент обеспечения потребностей человечества к 2050 году электроэнергией от солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) может достичь уровня 80 %.

В настоящее время Россия отстаёт от уровня генерации энергии возобновляемыми источниками от европейских стран. Доля солнечной генерации составляет менее 0,001 % в общем энергобалансе.

Таким образом, анализ научно-технической литературы показал, перспективным направлением в вопросах энергосбережения и повышения эффективности электроснабжения потребителей отдалённых от внешних сетей в России является применение СФЭС [1].

Наибольшее распространение получили солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ) на основе кремния трех видов: монокристаллического, поликристаллического и аморфного.

Сегодня известно, что для фотопреобразователей из монокристаллического кремния в лабораторных условиях на опытных образцах достигнут КПД 24%. Для поликристаллического кремния эти значения равны примерно 17%, для аморфного кремния на опытных модулях достигнуты КПД около 11 %. Все эти данные соответствуют однослойным фотоэлементам. В настоящее время известны двух- и трехслойные фотоэлементы, которые позволяют использовать большую часть солнечного спектра по длине волны солнечного излучения. Для двухслойного фотоэлемента на опытных образцах получен КПД 30%, а для трехслойного 35-40%.

Основными достоинствами СФЭУ и, соответственно, солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) являются:

- 1) повсеместная распространенность на Земле;
- 2) неограниченность ресурсов;
- 3) энергия, получаемая от солнечных электростанций, бесплатная;
- 4) высокий срок службы (более 30 лет);
- 5) экологическая чистота;
- 6) низкий уровень эксплуатационных затрат.

Основными недостатками СФЭС являются:

1) низкий общий КПД, который зависит от КПД фотоэлементов и инверторов;

2) высокая стоимость (фотоэлементов и аккумуляторных батарей).

Эти недостатки приводят к тому, что в настоящее время стоимость электроэнергии, вырабатываемую с помощью СФЭС, превышает стоимость электроэнергии, вырабатываемую от традиционных источников электроэнергии.

Однако поскольку удельная стоимость солнечной электростанции не зависит от её размеров и мощности, в ряде случаев целесообразно размещение фотоэлемент СФЭС на крыше домов, коттеджей, ферм и т. п.. В этом случае собственнику СФЭС необходимо продавать электроэнергию энергосистеме в дневное время, и покупать её у энергетической компании в ночные часы. Преимущества такого подхода использования связаны с экономией на опорных конструкциях и площади земли, а также совмещение функции крыши и источника энергии.

Учитывая, что 1 кг кремния в солнечном элементе вырабатывает за 30 лет 300 МВт ч электроэнергии, легко подсчитать нефтяной эквивалент кремния. Прямой пересчет электроэнергии 300 МВт ч с учетом теплоты сгорания нефти 43,7 МДж/кг даёт 25 т нефти на 1 кг кремния. Если принять КПД тепловых электростанций, работающей на мазуте, 33%, то 1 кг кремния по вырабатываемой электроэнергии эквивалентен примерно 75 тоннам нефти.

В связи с высокой надежностью срок службы СФЭС по основной компоненте – кремнию и солнечным элементам может быть увеличен до 100 лет. Единственным ограничением может явиться необходимость их замены на более эффективные элементы, поскольку КПД до 30% будет достигнут в производстве в ближайшее время. В случае замены солнечных элементов кремний может быть использован повторно и количество циклов его использования не имеет ограничений во времени.

Основными компонентами СФЭУ являются солнечные батареи (модули); аккумуляторные батареи; автономные инверторы. Наибольшее распространение получили солнечные батареи, выполненные на монокристаллических или поликристаллических кремниевых элементах.

Солнечные батареи, как правило, разрабатываются на номинальное напряжение 12 В, а их мощность на 1 м<sup>2</sup> находится в пределах 100-350 Вт.

Электрические параметры солнечных батарей представляются в виде вольтамперной характеристики, снятой при стандартных условиях, т.е. когда мощность солнечной радиации составляет 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура элементов – 25°С и солнечный спектр – на широте 45° (рисунок 1).

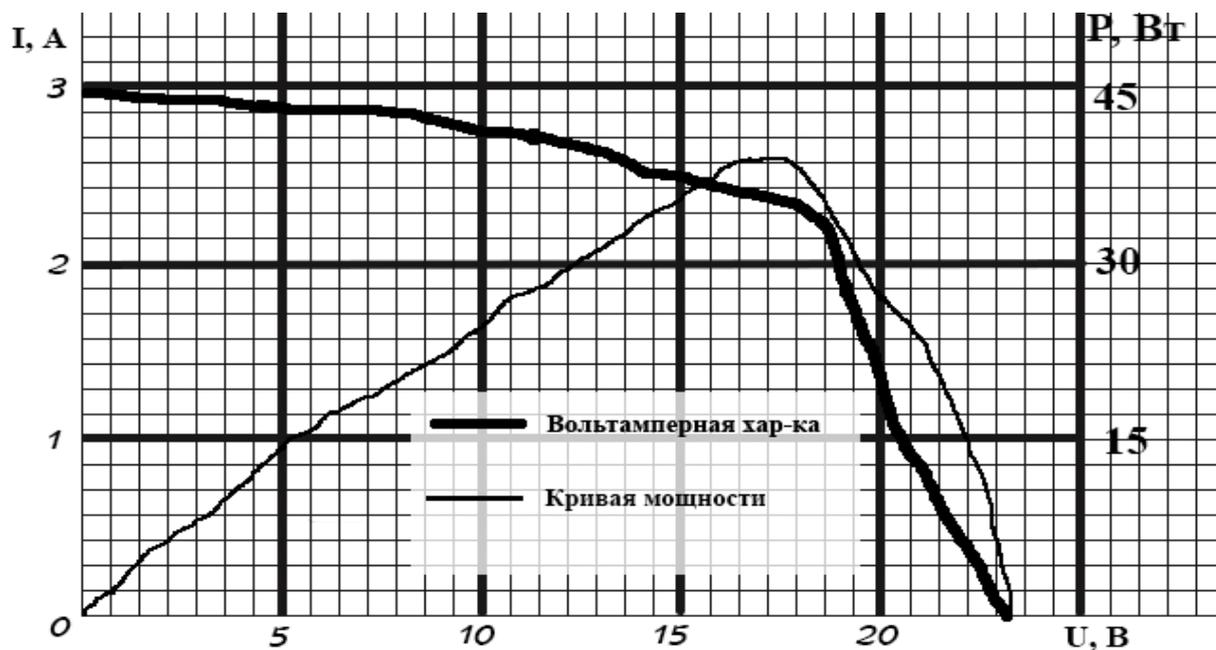


Рисунок 1 – Вольтамперная характеристика солнечной батареи

На рисунке 1 также приведена кривая мощности, отбираемой от солнечной батареи в зависимости от напряжения нагрузки. Номинальная мощность модуля определяется как наибольшая мощность при стандартных условиях.

На СФЭУ нашли применение электрохимические аккумуляторы, которые являются источником электроэнергии в тёмное время суток. Основными условиями по выбору аккумуляторных батарей являются: стойкость к циклическому режиму работы (заряд – разряд); способность выдерживать глубокий разряд; низкий саморазряд; долговечность; простота в обслуживании.

Основными достоинствами аккумуляторных батарей являются

- длительный срок службы –15 лет;
- стойкость к циклическому режиму – более 1000 циклов;
- отсутствие необходимости обслуживания на протяжении срока службы;
- не требуют обслуживания в период срока службы;
- саморазряд составляет приблизительно 3% в месяц.

Для преобразования постоянного тока аккумуляторной батареи в переменный синусоидальной формы применяется инвертор. Инверторы разделяются на два типа [2, 3]:

- инверторы для автономных систем;
- инверторы для сетевого применения.

Главное отличие инверторов в работе схемы управления. Первый тип имеет генератор эталонной частоты (генератор опорного сигнала), а второй должен работать синхронно с промышленной сетью (и в качестве генератора частоты используется сама сеть). Для всех типов инверторов основной электрический параметр – КПД который находится в пределах 85 –92 %.

Выходное напряжение автономных инверторов в большинстве случаев составляет 220 В (50/60 Гц). Инверторы мощностью от 10 до 100 кВт, как правило, выполняются трёхфазными на напряжение 380 В. Все автономные инверторы преобразуют напряжение постоянного тока аккумуляторных батарей напряжением 12, 24, 48 и 120 В. Чем больше

выходное напряжение, тем проще инвертор и тем выше его КПД. При больших напряжениях значительно меньше потери на передачу энергии от солнечных батарей к аккумуляторной батарее, но при этом усложняется конструкция солнечных батарей и их эксплуатация при повышенных напряжениях (выше 40 В).

К качеству выходного напряжения автономных инверторов предъявляются менее жесткие требования. Если позволяет нагрузка в составе СФЭУ применяются автономные инверторы с трапециидальным выходным напряжением. Что важно, такие инверторы в 2...3 раза дешевле инверторов с синусоидальным выходным сигналом. Важный параметр автономных инверторов – зависимость КПД от мощности нагрузки [4]. Известно, что КПД должен не значительно уменьшаться при подключении нагрузки в десять раз меньшей (по потребляемой мощности), чем номинальная мощность инвертора. В идеальном случае к автономным инверторам предъявляются следующие требования:

- способность выдерживать перегрузки;
- низкие потери электроэнергии при малых нагрузках и на холостом ходу;
- обеспечивать стабилизацию выходного напряжения;
- высокий КПД;
- отсутствие электромагнитных помех, создаваемых силовыми электронными приборами.

Известно, что в зависимости от назначения потребителя, требований к качеству электроэнергии различают три типа СФЭС: автономные; резервные; работающие с сетью.

В удаленных районах, где нет централизованного электроснабжения, СФЭС используется для электроснабжения отдельных потребителей. В таких станциях производимая электроэнергия потребляется нагрузкой и

одновременно аккумулируется в батареях для использования в темное время суток или в период слабой солнечной радиации.

Все типы СФЭС имеют общую структуру и содержат (рисунок 2): фотоэлектрические модули (ФЭМ); контроллер заряда (КЗ), который служит для защиты аккумуляторных батарей от избыточной подзарядки, а также от избыточной разрядки в ходе использования; систему аккумуляции (СА) которая содержит аккумуляторные батареи, емкость которых полностью обеспечивает требуемый уровень автономности в отношении электроснабжения подключенной нагрузки; инвертор (И); нагрузка (Н).

Резервные СФЭУ применяются если есть ввод от сети централизованного электроснабжения. В случае отключения сети или недостаточного сетевого напряжения в работу включаются СФЭУ. Малые резервные СФЭУ применяются для электроснабжения ответственных потребителей электроэнергии, перерыв в электроснабжении которых может привести к сбою в работе компьютерной техники, технологических процессов и т. п. Чем больше мощность, необходимая для электроснабжения ответственных потребителей, и чем дольше периоды отключения сети, тем больше необходима мощность СФЭС.

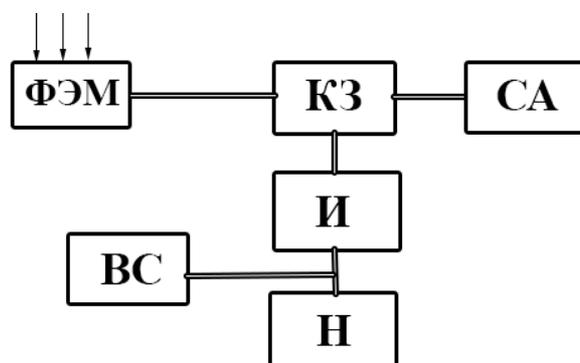


Рисунок 2 – Структурная схема подключения СФЭС  
(автономные, резервные, работающие с сетью)

Если СФЭУ подключена к сети централизованного электроснабжения, избыток электрической энергии целесообразно продавать электросетям, если есть соответствующий закон, позволяющий это делать.

Для повышения надёжности работы СФЭС необходимо их конструировать по модульному принципу [5, 6]. Практически солнечные батареи – это отдельные модули. Целесообразно также применять типовые аккумуляторные батареи, которые также представляют отдельный модульный функциональный блок. Модульное агрегатирование необходимо также применить для автономных инверторов, где в качестве функциональных модульных элементов представить входные и выходные фильтры, силовую электронную схему и систему стабилизации напряжения и защиты.

Значительно повысить показатели надёжности автономных инверторов и СФЭУ в комплексе можно за счёт применения в их конструкции однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем [7, 8].

Таким образом, рассмотренные в статье достоинства и недостатки, особенности работы СФЭС позволят в перспективе разрабатывать их структурно-схемные решения с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками.

#### **Список литературы**

1. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е., Квитко А.В. Возобновляемые источники электроэнергии: термины, определения, достоинства и недостатки // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. - № 32. – С. 189-192.
2. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии. Краснодар. 2006. С.264.
3. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения. Краснодар. 2011. С.188.
4. Богатырев Н.И., Григораш О.В., Курзин Н.Н. и др. Преобразователи электрической энергии: основы теории, расчета и проектирования. Краснодар. 2002. С.358.

5. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. Краснодар. 2005. С. 306.
6. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости узлов САЭ. Промышленная энергетика. 2001. № 2. С.44-47.
7. Григораш О.В. Преобразователи электрической энергии на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем для систем автономного электроснабжения. Промышленная энергетика. 1997. № 7. С.21-25.
8. Григораш О.В., Кабанков Ю.А. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии. Электротехника. 2002. № 3. С.22-26.
9. Пат. РФ № 2420854, МПК H02M7/539. Однофазный автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией / Григораш О. В., Степура Ю. П., Усков А. Е., Тонкошуров Ю. Н., Сулейманов А. Э., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет». – № 2010119105/07, заявл. 11.05.2010; опубл. 10.06.2011; бюл № 16. – 7 с.
10. Пат. РФ № 2420855, МПК H02M7/539. Преобразователь напряжения постоянного тока на реверсивном выпрямителе / Степура Ю. П., Григораш О. В., Власенко Е. А., Усков А. Е., Перенко Ю. М., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет». – № 201011906/07, заявл. 11.05.2010; опубл. 10.06.2011; бюл. № 16. – 9 с.
11. Усков А. Е. Автономный инвертор, повышающий эксплуатационные характеристики солнечных электростанций АПК: дис. канд. техн. наук. / А. Е. Усков; КубГАУ. – Краснодар, 2014. – 113 с.

#### References

1. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E., Kvitko A.V. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenergii: terminy, opredelenija, dostoinstva i nedostatki // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. - № 32. – S. 189-192.
2. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. Sticheskie preobrazovateli jelektrojenergii. Krasnodar. 2006. S.264.
3. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E. Sticheskie preobrazovateli i stabilizatory avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2011. S.188.
4. Bogatyrev N.I., Grigorash O.V., Kurzin N.N. i dr. Preobrazovateli jelektricheskoi jenergii: osnovy teorii, rascheta i proektirovanija. Krasnodar. 2002. S.358.
5. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2005. S. 306.
6. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovместимости узлов SAJe. Promyshlennaja jenergetika. 2001. № 2. S.44-47.
7. Grigorash O.V. Preobrazovateli jelektricheskoi jenergii na baze transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Promyshlennaja jenergetika. 1997. № 7. S.21-25.
8. Grigorash O.V., Kabankov Ju.A. K voprosu primenija transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem v sostave preobrazovatelej jelektrojenergii. Jelektrotehnika. 2002. № 3. S.22-26.
9. Pat. RF № 2420854, МПК H02M7/539. Odnofaznyj avtonomnyj invertor s shirotno-impul'snoj moduljaciej / Grigorash O. V., Stepura Ju. P., Uskov A. E., Tonkoshkurov Ju. N., Sulejmanov A. Je., zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO

«Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyj universitet». – № 2010119105/07, zajavl. 11.05.2010; opubl. 10.06.2011; bjul № 16. – 7 s.

10. Pat. RF № 2420855, MPK H02M7/539. Preobrazovatel' naprjazhenija postojannogo toka na reversivnom vyprjamitele / Stepura Ju. P., Grigorash O. V., Vlasenko E. A., Uskov A. E., Perenko Ju. M., zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyj universitet». – № 201011906/07, zajavl. 11.05.2010; opubl. 10.06.2011; bjul. № 16. – 9 s.

11. Uskov A. E. Avtonomnyj invertor, povyshajushhij jekspluacionnye harakteristiki solnechnyh jelektrostantsij APK: dis. kand. tehn. nauk. / A. E. Uskov; KubGAU. – Krasnodar, 2014. – 113 s.