Uzbek Journal of Physics

Vol.20(№3) 2018 PP.173-183

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Г. Абдурахманов[1], Г.С. Вахидова[2], С.А. Маматкулова[1]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, 100125 Ташкент, Узбекистан
[2]Научно-технический центр АО Узбекэнерго, 100025 Ташкент, Узбекистан
(Получена 04.04.2018)

Қуёш нури энергиясини электр энергиясига айлантириш жараёни масса, заряд ва энергия оқимлари нуқтаи назаридан таҳлил қилинади. Ўзгартгичларнинг, шу жумладан фотоэлектрик ўзгартгич (ФЭЎ)ларнинг ҳам самарадорлигида, барча бошқа энергия манбаларидаги каби, анча қаттиқ чекланишлар мавжуд. Бу чекланишлар манбаънинг ички қаршилиги оқибати бўлиб, унда иссиқлик ажралиб чиқади ва атроф-муҳитга сочилади. Шу сабабдан қуёш энергияси ўзгартгичларининг самарадорлигини каскад (кетма-кет босқичлар) қилиб улаш орқали ошириш мумкин, ва бунда иккинчи ва кейинги босқичлар фақат термоэлектрик ўзгартгичлар бўлиб, биринчи босқичдан чиққан ташландиқ иссиқликдан фойдаланади. Яна шу нарса кўрсатилдики, қуёш энергиясининг ФЭЎларида ток бўйича ички тескари алоқа мавжуд бўлиб, ўзгартгичларнинг максимал қувват режимида ишлашига йўл қўймайди. Бу тескари алоқанинг физикавий табиати ҳозирча аниқланмаган ва оқибат юқори самарали ФЭЎлар яратишга тўсқинлик қилади.

Процесс преобразования энергии солнечного излучения в электрическую анализируется с позиций внутренних потоков массы, заряда и энергии. Показано, что эффективность преобразователей, в том числе и фотоэлектрических (ФЭП), как и любых других источников энергии, имеет достаточно жесткое ограничение, обусловленное внутренним сопротивлением, в котором выделяется тепло, рассеиваемое в окружающей среде. Поэтому повысить эффективность ФЭП солнечной энергии можно их каскадным включением, причем второй и последующие каскады должны быть только термоэлектрическими, использующими бросовое тепло первого каскада. Показано также, что в ФЭП солнечного излучения действует внутренняя обратная связь по току, препятствующая работе преобразователя в режиме максимальной мощности. Физическая природа этой обратной связи пока не установлена, что мешает созданию высокоэффективных ФЭП.

Conversion process of energy of solar radiation into electricity is analyzed from point of view of mass, charge and energy transport. It is shown that, as in all other kinds of energy sources, there are limitations for conversion efficiency of photoelectric converters (PEC) of solar radiation, caused by internal resistance for transport process. As a result, essential part of primary energy turns into heat and dissipated to environment. So efficiency of PEC can be improved by cascade connection and second cascade as well as consequent ones should be only thermoelectric units using the waste heat of first cascade. It is shown as well that there is current feedback in PEC which makes impossible to work in the conductions of maximum power. The physical origin of this feedback is not established yet and that is restriction to design the PEC of higher efficiency.

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение КПД преобразования различных видов энергии, в том числе и солнечного излучения, в электрическую является важным направлением исследований в использовании энергии возобновляемых источников. В частности, в гелиоэнергетике с этой целью разработаны многослойные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), показавшие в лабораторных условиях рекордный КПД в

43% при освещении концентрированным светом [1]. КПД однослойных ФЭП поскромнее – 28.3% при концентрации света в 500 раз [2]. На кремниевых ФЭП с микрофокусировкой достигнут КПД 34% [3].

Однако высокая степень концентрации солнечного излучения создает, особенно при большой генерируемой мощности, ряд технических проблем, как-то: перегрев ФЭП, электрические шины большого сечения (соединять большое число элементов для получения высокого напряжения нежелательно из-за проблем с изоляцией), точность слежения за положением Солнца. Например, ФЭП с КПД 40% и электрической мощностью 0.8 кВт (мощность падающего потока света 2 кВт) при концентрации света в 500 раз должен иметь активную площадь в 40 см^2, и от него должна отводиться тепловая мощность в 1.2 кВт, что при отводе тепла свободной конвекцией потребует площади радиаторов более 4 м^2 [4] при температуре окружающей среды 50°C (при условии, что радиатор расположен вертикально). А сечение шин должно быть не менее 70 мм^2 при напряжении 12 В, чтобы падение напряжения на них не превышало 5% при максимальном токе нагрузки. Аналогичные ограничения действуют для всех видов преобразователей энергии (термоэлектрических, термоэлектронных, магнитогидродинамических, электромеханических). Эти ограничения можно условно назвать техническими.

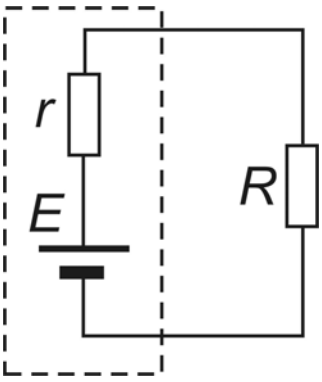


Рис. 1. Источник электрического тока с нагрузкой. Пунктирной линией выделен собственно источник тока.

В то же время существуют физические ограничения, накладываемые внутренними процессами в самом преобразователе энергии. Эти ограничения рассмотрим на примере источника электрического тока с ЭДС E и внутренним сопротивлением r, к которому подключена внешняя нагрузка с сопротивлением R (рис. 1). В общем случае под r следует понимать суммарный эквивалент всех факторов, приводящих к потере энергии внутри самого преобразователя.

Такое представление является универсальным, так как в любых преобразователях (источниках) энергии имеются физические механизмы, аналогичные внутреннему сопротивлению r и препятствующие перемещению энергии, массы, заряда.

II. ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ. ОБЩЕЕ РАССМОТРЕНИЕ

Согласно закону Ома для замкнутой цепи, показанной на рис. 1, ток в цепи $I = E/(R+r)$. При изменении сопротивления нагрузки R напряжение на выходных клеммах преобразователя (на нагрузке) $V_L = IR = ER/(R+r) = E - I \cdot r$ уменьшается, как показано на рис. 2, и при $R = r$ становится равным $E/2$. Выделяемая на нагрузке (полезная) мощность $P = E^2R/(R+r)^2$, полная мощность источника $P_0 = E^2/(R+r)$, а мощность, развиваемая источником при коротком замыкании, равна $P_{max} = E^2/r$. Коэффициент полезного действия (КПД, эффективность) преобразователя

$\eta(R) = P/P_0 = R/(R+r)$ при неизменных E и r является монотонно возрастающей функцией R/r (рис. 3) и достигает 0.5 в режиме максимальной мощности. Остальная половина мощности, развиваемой источником, выделяется на его внутреннем сопротивлении r и в конечном итоге рассеивается в окружающей среде в виде тепла. Заметим, что полная мощность источника P_0 при $R/r = 1$ составляет половину мощности P_{max}, развиваемой при коротком замыкании, что отражено на рис. 3 множителем 2 при P/P_{max}.

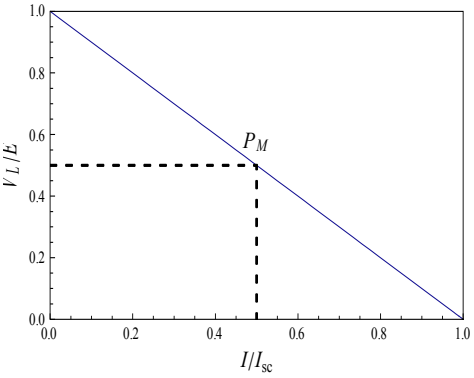


Рис. 2. Зависимость напряжения на нагрузке V_L от тока I для замкнутой цепи при постоянном внутреннем сопротивлении r источника.

Подчеркнем, что r не соответствует ни омическому сопротивлению проводов обмотки в электромеханических генераторах, ни сопротивлению материала базовой области ФЭП, а характеризует именно способность преобразователя перевести энергию одного вида в другой вид и возникающие при этом внутри преобразователя энергетические потери всех разновидностей.

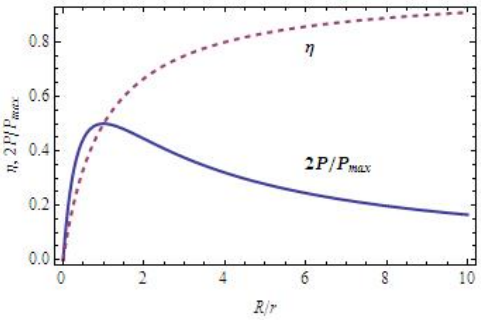


Рис. 3. Зависимость мощности на нагрузке P и КПД η от сопротивления нагрузки R при r = const.

Из рис. 3, казалось бы, следует, что добиться $\eta > 0.5$ можно, выбрав $R/r > 1$. Например, при $R/r = 4$ имеем $\eta = 0.8$. Но обеспечение условия $R/r > 1$ часто оказывается невозможным в силу технологических, экономических причин или условий работы преобразователей.

В частности, в электрических турбогенераторах большой мощности, преобразующих механическую энергию вращения вала турбины (паровой или газовой) в электрическую, во внутреннем сопротивлении r участвуют магнитные потери в статоре и роторе, а также потери в немагнитных зазорах между ними, омическое сопротивление обмоток, потери на вихревые токи. Для снижения потерь энергии требуется улучшить качество ферромагнитного материала статора и ротора, уменьшить немагнитные зазоры и толщину листов для их изготовления, охлаждать обмотки до низких температур, что создает проблемы в изготовлении статоров и роторов с необходимой точностью и в их центровке, обеспечение механической прочности, наличие дополнительных устройств охлаждения. Кроме того, возрастают габариты и масса оборудования, поскольку его расчетная мощность должна быть существенно больше, чем потребляет нагрузка, а стоимость возрастает еще больше. Именно увеличение относительной ширины немагнитного зазора (по сравнению с общей длиной магнитных силовых линий) и доли объема,

занимаемой изоляцией обмоток (поэтому не участвующей в прохождении тока в обмотках) приводит к закономерному снижению КПД электродвигателей и электромеханических генераторов от 98 до 5–10% по мере уменьшения их мощности [5].

В случае же ФЭП природа r не совсем ясна. Анализ физических процессов в ФЭП показывает, что в r основной вклад дают затраты энергии на образование электронно-дырочных пар (внутренний квантовый выход) и их рассеяние (омическое сопротивление базы). На первый взгляд, омическое сопротивление базы (области n- и p-типа проводимости, рис. 4) можно уменьшить снижением удельного сопротивления используемого материала или уменьшением толщины базы. Но уменьшение толщины базы ФЭП приводит к технологическим и эксплуатационным сложностям, обусловленным снижением механической прочности элементов. Выполнению условия $R/r > 1$ в этом случае препятствует также постоянство максимальной плотности потока мощности солнечного излучения (до 1.5 кВт/м^2 в зависимости от местности), которую можно повысить применением концентраторов, т.е. снова через увеличение габаритов, массы и стоимости оборудования.

Снижение удельного сопротивления используемого полупроводникового материала путем повышения уровня легирования дает, по-видимому, неоднозначный и недостаточный эффект из-за снижения внутреннего квантового выхода и усиления рекомбинации генерируемых электронно-дырочных пар.

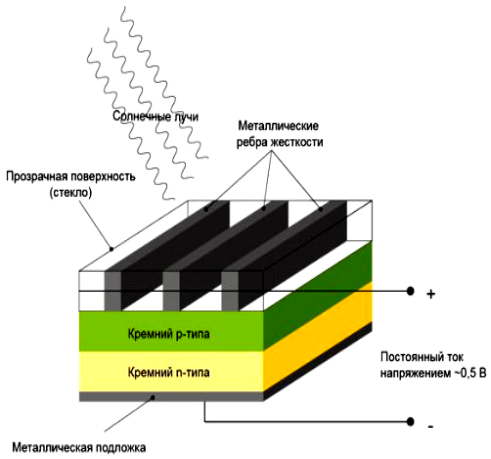


Рис. 4. Устройство ФЭП.

С другой стороны, эксперименты показывают, что у ФЭП r резко возрастает при достижении определенной величины тока нагрузки I, что указывает на внутренние обратные связи в них и делает достижение условия $R/r=1$ принципиально невозможным. В следующем разделе рассмотрим особенности вольтамперных характеристик $V(I)$ различных преобразователей энергии и возможности обеспечения максимального КПД η в них.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

III.1. Электромеханические преобразователи

Внутренние связи ярко проявляются в генераторе постоянного тока со смешанным возбуждением [6], где возбуждающее магнитное поле статора создается одновременно двумя статорными обмотками (рис. 5*а*), одна из них включена параллельно якорю (обмотка Ш1-Ш2), а другая – последовательно с нагрузкой (обмотка С1-С2). При этом последовательная обмотка С1-С2 может быть включена так, что ее магнитное поле усиливает магнитное поле параллельной обмотки (согласное включение) или ослабляет его (встречное включение). На обмотке якоря Я1-Я2 развивается электродвижущая сила E.

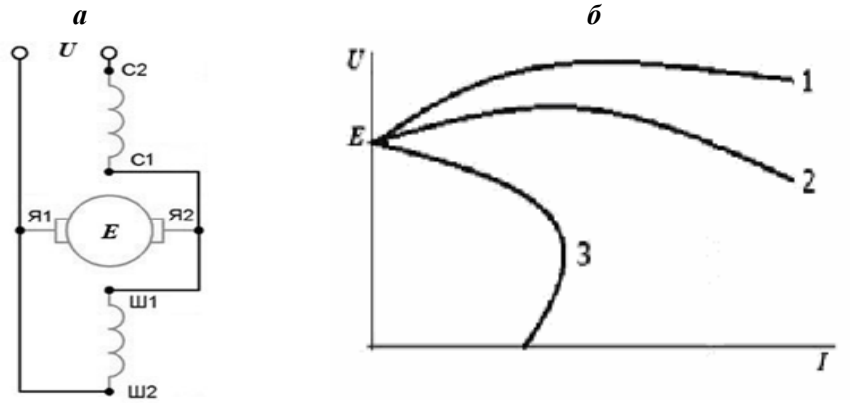


Рис. 5. Включение обмоток в генераторе постоянного тока со смешанным возбуждением (*а*) и его вольтамперная характеристики (*б*) [6].

Меняя число витков согласно включенной последовательной обмотке, можно получить характеристику, когда напряжение на клеммах генератора $U > E$ (кривая *1* на рис. 5*б*), что необходимо для компенсации падения напряжения на линии передачи, или обеспечить стабильность U в пределах 2–3 % при изменениях тока нагрузки от нуля до максимально допустимого значения (кривая *2* на рис. 5*б*).

При встречном включении обмотки возбуждения напряжение генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается (кривая *3*), что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, намагничивающая сила которой направлена встречно намагничивающей силе параллельной обмотки.

Встречное включение последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяют в сварочных генераторах и других специальных машинах, где требуется ограничить ток короткого замыкания.

Сравнивая между собой характеристики на рис. 5*б*, видим, что последовательная обмотка возбуждения может создавать как положительную обратную связь (при согласованном включении), так и отрицательную (при встречном включении). Соответственно этому внутреннее сопротивление $r = (E\text{-}U)/I$ или $r = dU/dI$ генератора постоянного тока со смешанным возбуждением в качестве преобразователя механической энергии в электрическую может быть отрицательным (до максимума на кривых *1* и *2*) или положительным (после максимума на кривых *1* и *2*, а также кривая *3* до максимального тока). При некоторой промежуточной величине отрицательной обратной связи (между кривыми *2* и *3* на рис. 5*б*), создаваемой последовательной обмоткой, можно получить резкий спад напряжения на клеммах генератора после достижения критического тока, аналогично ВАХ ФЭП [7] (рис. 6).

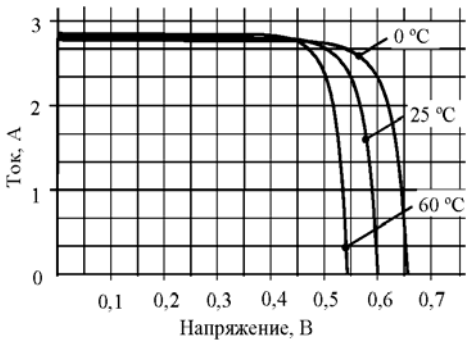


Рис. 6. Вольтамперная характеристика монокристаллического кремниевого ФЭП [7].

Введение положительной и отрицательной обратной связи для настройки формы вольтамперной характеристики (введение регулируемой обратной связи) используется также в сварочных генераторах переменного тока с выпрямителем [8]. Отсюда по аналогии можно заключить, что в ФЭП действует внутренняя обратная связь по току, физическая природа которой пока не установлена.

С этой точки зрения ТЕП является идеальным источником тока [9] с постоянным внутренним сопротивлением, которое не меняется во всех режимах нагрузки (рис. 7), т.е. без обратной связи.

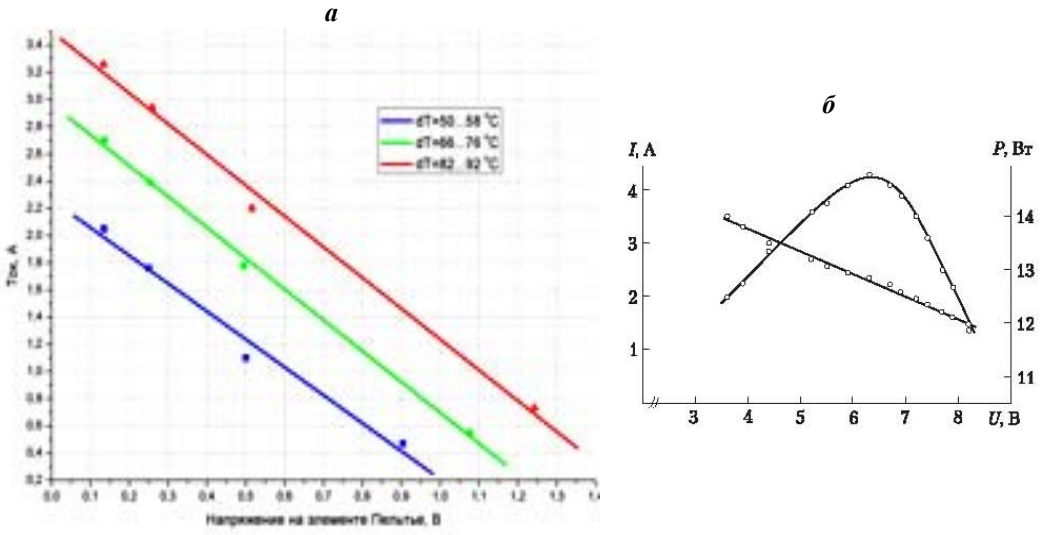


Рис. 7. ВАХ термоэлектрического модуля ТЕС-12709 при разных перепадах температуры (*а*) [9] и выходная мощность ТЭП (*б*) [10].

Не следует думать, что отрицательное внутреннее сопротивление $r = (E–U)/I$ или $r = dU/dI$ генератора постоянного тока со смешанным возбуждением приводит к отрицательным потерям энергии в генераторе. В действительности, превышение U над E при возрастании I обеспечивается тем, что мощность, потребляемая от двигателя, приводящего этот генератор во вращение, возрастает быстрее, чем при положительном r. С этой точки зрения было бы интересно изучить вольтамперные характеристики такого генератора при постоянной потребляемой механической мощности, как это имеет место в магнитогидродинамических, термоэмиссионных, термоэлектрических и фотоэлектрических источниках электрического тока.

Таким образом, можно считать, что по совокупности технико-экономических показателей режим работы преобразователей энергии $R/r = 1$ является наижелательным (кстати, это условие является обязательным в высокочастотных радиоэлектронных устройствах [11]). При этом половина поступающей в ФЭП энергии солнечного излучения превращается в тепло, которое обычно бесполезно (или даже вредно) рассеивается в окружающей среде.

С другой стороны, экспериментальные результаты [7] показывают (рис. 6), что r ФЭП возрастает с током нагрузки $I_н$ и ФЭП из источника напряжения ($R/r >> 1$, малые токи $I_н$) превращается в источник тока ($R/r << 1$, большие токи $I_н$). Отсюда

следует, что в ФЭП режим $R/r = 1$ невозможно обеспечить. Рассмотрим этот момент подробнее ввиду его важности (рис. 8*а*).

Из эквивалентной схемы источника электрической энергии (рис. 1) следует, что напряжение U на его зажимах (или на нагрузке R) определяется выражением:

$$U = E - I_н r,$$

и при постоянном r зависимость $U(I_н)$ представляет собой почти прямую линию (участок $0 < I_н < 1$ А при температуре 25°С на рис. 6), откуда $r = \Delta U/\Delta I \approx 0.022$ Ом, тогда как сопротивление нагрузки $R(I = 1\text{ А}) = U/I = 0.59$ Ом, т.е. ФЭП работает в режиме холостого хода $R >> r$.

Однако в области максимальных токов ситуация резко меняется: теперь $r = \Delta U/\Delta I \approx 0.5/0.02 \approx 25$ Ом, тогда как $R(I = 2.7\text{ А}) = U/I = 0.17$ Ом, и ФЭП работает в режиме короткого замыкания $R << r$ из-за возрастания внутреннего сопротивления r от 0.022 до 25 Ом, т.е. более чем в 1000 раз. Приведенные оценки R и r довольно грубые, так как использовались графические данные, но при изменении r более чем в 1000 раз ошибкой даже в 50% можно пренебречь.

На рис. 8*б* показано, какой должна бы быть генерируемая мощность P_M солнечной батареи при неизменном внутреннем сопротивлении $P_M(U=E/2)=170$ Вт, тогда как реально достигается 50 Вт, т.е. реальный КПД в 3,4 раза меньше.

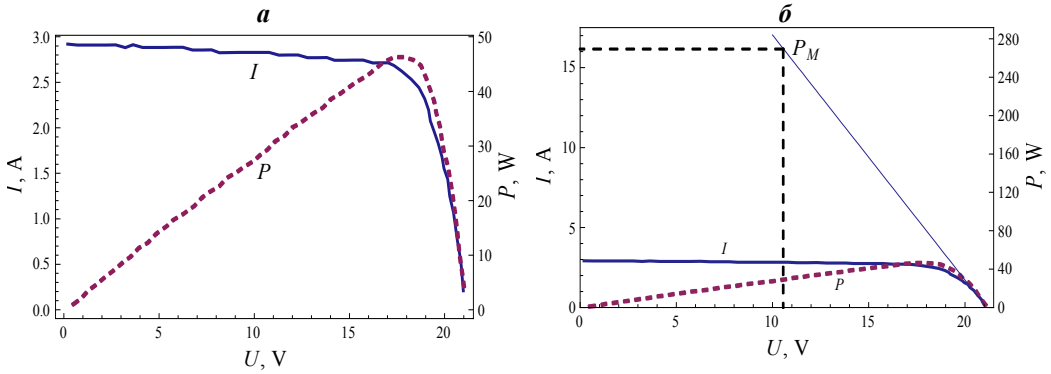


Рис. 8. ВАХ и выходная мощность P солнечной батареи из 36 ФЭП [7] (а) и определение мощности $P_М(U = E/2)$ для той же батареи (*б*).

Для ВАХ (рис. 8*а*) имеем $r(I = 0.4\text{ А}) = \Delta U/\Delta I \approx 0.4$ Ом, тогда как сопротивление нагрузки $R(I = 0.4\text{ А}) = U/I = 50$ Ом, т. е. ФЭП работает в режиме холостого хода $R >> r$.

Однако в области максимальных токов ситуация опять резко меняется: теперь $r = \Delta U/\Delta I \approx 45.3$ Ом, тогда как $R(I = 2.9\text{ А}) = U/I = 5.8$ Ом, и ФЭП работает в режиме короткого замыкания $R << r$ из-за возрастания внутреннего сопротивления r от 0.4 до 45 Ом, т. е. более чем в 100 раз. Анализ ВАХ большого числа ФЭП показывает, что изменение r для наиболее совершенных экземпляров будет еще больше – до 1000 раз. Приведенные оценки R и r довольно грубые, так как использовались графические данные, но при изменении r более чем в 100 раз ошибкой даже в 50% можно пренебречь.

Эти рассуждения в полной мере применимы и к термофотоэлектрическим преобразователям [12], и к системам с разделением спектра [13]. В первых широкий спектр солнечного излучения преобразуется вначале в тепловое

излучение с узким интервалом частот, а затем вторичное излучение преобразуется в электрическую энергию с помощью селективного ФЭП с высоким КПД. Во втором случае из солнечного спектра выделяются узкие участки, которые преобразуются в электричество соответствующими селективными ФЭП.

Следовательно, и здесь использование преобразователей тепловой энергии в комбинации с ФЭП (каскадное включение – последовательно по потоку поступающей энергии, параллельное – по преобразованной энергии) является обязательным условием для повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

Такие комбинированные системы преобразователей интенсивно исследуются в последние годы [14, 15], и когенерационные (электричество+горячая вода) солнечные установки уже поступают в продажу [16].

Однако потребность в электрической энергии всегда выше, чем в тепловой энергии. Поэтому сочетание ФЭП с преобразователями тепла в электричество является наиболее востребованным вариантом, особенно в странах с жарким климатом.

По всем характеристикам (геометрические, физические, долговечность и надежность) наилучшее сочетание с ФЭП обеспечивают термоэлектрические преобразователи (ТЭП), и именно комбинированные фототермоэлектрические преобразователи являются предметом исследований во многих случаях [14, 17-19].

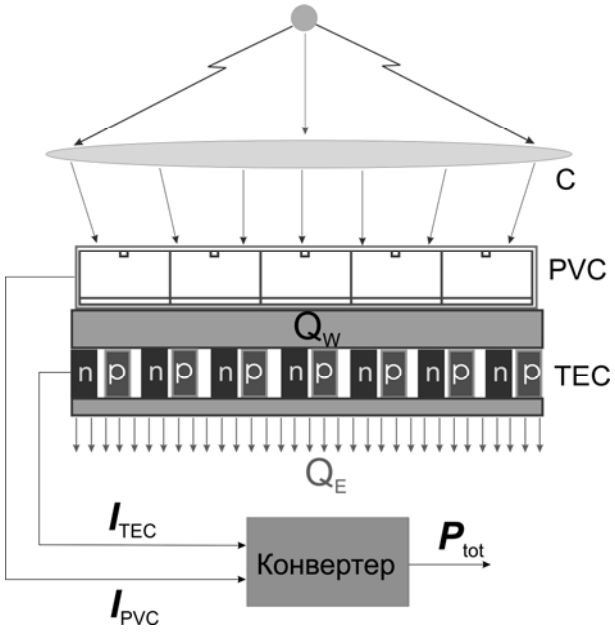


Рис. 9. Комбинированная фототермоэлектрическая система: C – концентратор солнечного излучения, PVC – фотоэлектрический преобразователь, ТЭС – термоэлектрический преобразователь, Q_W – бросовое тепло после ФЭП, Q_E – бросовое тепло после ТЭП (в окружающую среду), I_{TEC} – выходной ток ТЭП, I_{PVC} – выходной ток ФЭП, P_{tot} – общая выходная мощность системы.

В фототермоэлектрических преобразователях солнечной энергии (рис. 9) ТЭП располагается на тыльной стороне ФЭП и между ними обеспечивается хороший тепловой контакт. Поскольку эффективность ТЭП растет пропорционально температуре горячей стороны (которая одновременно является тыльной, холодной стороной ФЭП), то ФЭП должен быть изготовлен из материала, способного длительно и эффективно работать при температурах 450–500 К.

Электрический ток, выработанный ФЭП и ТЭП, поступает на вход конвертера, где объединяется, преобразуется в переменный ток частоты 50 Гц (квазисинусоидальный) и стабилизируется по среднему значению, после чего поступает к потребителям.

При этом ТЭП может быть в свою очередь также много-

каскадным, причем каскады здесь могут быть как внутри одного ТЭП в виде сочетания термоэлектрических материалов, оптимизированных в разных диапазонах температур, так и в виде отдельных термоэлектрических модулей, опять-таки оптимизированных в соответствующих температурных областях.

Таким путем можно добиться коэффициента полезного действия η системы ФЭП+ТЭП, сравнимого (или даже выше) с КПД существующих преобразователей с механическим звеном. Например, для системы, состоящей из ФЭП с η = 20% и двух каскадов ТЭП с $\eta_{ТЭП}$ = 12.5%, получаем суммарный КПД $\eta = \eta_{ФЭП}+(1-\eta_{ФЭП})\eta_{ТЭП}+(1-(\eta_{ФЭП}+(1-\eta_{ФЭП})\eta_{ТЭП})\eta_{ТЭП} = 0.3875 = 38.75\%$.

В общем случае для системы, состоящей из N каскадов с КПД η_0 каждого, общий КПД будет

$$\eta = \eta_0 (1 - \eta_0)^{N-1}.$$

Эта зависимость для нескольких значений η_0 показана на рис. 10, откуда видно, что при $\eta_0 \geq 0.2$ уже после трех каскадов рост η замедляется, т.е. дальнейшее увеличение числа каскадов не дает существенного роста КПД системы.

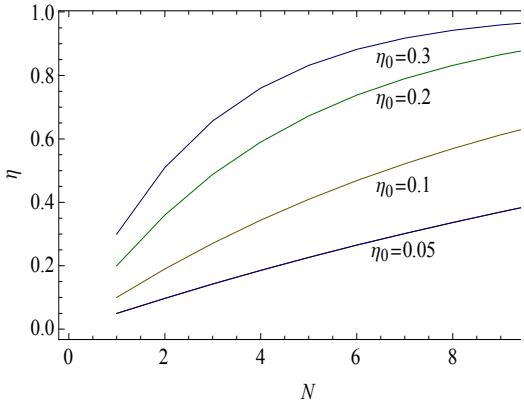


Рис. 10. Зависимость общего КПД η от числа каскадов N при разных значениях КПД η_0 одного каскада.

Согласованная система двухступенчатого высокоэффективного ФЭП на гетеропереходе *p*-$Al_xGa_{1-x}As$-*n*-GaAs и ТЭП из *n*-BiTeSe-*p*-BiTeSb при концентрации солнечного излучения в 20 раз показала КПД более 25% [19], из них около 10% вклад ТЭП. Применение двух- или трехступенчатого ТЭП позволит поднять КПД до 30–35%. Тогда такие комбинированные системы могут конкурировать по эффективности с другими источниками электроэнергии.

Как показано в [20, 21], в создании ТЭП для широкого применения в энергетике и материалов для них главным критерием должен быть не КПД, а соотношение цена/мощность. Пока же общим недостатком ФЭП и ТЭП по отдельности, а также комбинированных фототермоэлектрических преобразователей является высокая цена установленной мощности. Многослойные ФЭП или системы с частотной селекцией, устанавливающие рекорды по эффективности [1-3, 13], являются пока также дорогими из-за сложности технологии или конструкции, и проблему не решают. Более того, к этим системам в целом также применимы изложенные выше соображения о влиянии внутреннего сопротивления на КПД, так что и здесь использование каскадов ТЭП является неизбежным.

Применение дешевых кремниевых структур (по оценкам в ближайшие годы их цена может быть ниже 2 USD/Вт) в солнечных генераторах с концентраторами невозможно из-за резкого ухудшения их работы при температурах выше 330 К. Хотя арсенид-галлиевые элементы сохраняют свою эффективную работу при высоких рабочих температурах (до 420 К) [22], но их высокая цена не позволяет пока говорить о широком применении в солнечной энергетике.

В [23] обсуждается вопрос о том, нужен ли высокий КПД ТЭП для получения большой мощности при преобразовании бросового тепла. Показывается, что зачастую выходную мощность можно увеличить не увеличением термоэлектрической добротности *ZT*, а наоборот, через повышение теплопроводности при неизменном *ZT*, что несколько противоречит основной тенденции развития термоэлектрических материалов.

С другой стороны, применение ТЭП совместно с ФЭП без концентраторов не оправдано из-за низкой эффективности первых, изготовленных из существующих материалов, при малой разности температур горячей и холодной сторон (температура холодной стороны ТЭП не может быть ниже температуры окружающей среды).

Здесь отметим еще одну особенность применения функциональных материалов в ФЭП и ТЭП, связанную с уровнем преобразуемой мощности. Плотность потока мощности (Вт/м^2), поступающей в преобразователь, не должна превышать некоторого максимального значения во избежание перегрева и выхода из строя устройства. Поэтому количество используемого функционального материала ограничено снизу, что влияет напрямую на цену ФЭП и ТЭП – одним из главных направлений в исследованиях материалов для ФЭП и ТЭП является снижение их цены. При этом использование концентраторов солнечного излучения почти не меняет ситуацию при цене устройств менее 1 доллара США/кВт – сам концентратор добавляет в цену 0.5-1 доллар США/кВт [24].

Итогом изложенного является следующее.

Использование преобразователей энергии, в частности, ФЭП, совместно с ТЭП является неизбежным для повышения КПД преобразования.

Выяснение физической природы обратной связи по току в ФЭП является одним из важнейших вопросов создания эффективных ФЭП.

Поиск дешевых и эффективных материалов для ФЭП, работающих в потоке концентрированного солнечного излучения при температурах 600–700 К, и для ТЭП соответствующего диапазона температур (300–400 К) остается основной задачей в освоении солнечной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.membrana.ru/lenta/?9574.
2. http://www.membrana.ru/particle/13902.
3. http://www.facepla.net/index.php/component/tag/semprius.
4. Ю.Ф. Скрипников. Радиаторы для полупроводниковых приборов (Москва, Энергия, 1973).
5. Справочник по электрическим машинам. Под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Т. 1 (Москва, Энергоатомиздат, 1988); Т. 2 (Москва, Энергоатомиздат, 1989).
6. http://helpiks.org/1-120017.html.
7. П.В. Тихонов. Обоснование параметров фотоэлектрического теплового модуля. Дисс. канд. техн. наук (Москва, 2014).
8. http://www.welding.su/articles/sources/sources_27.html
9. http://inerton.ucoz.ru/publ/ehlektronika/dc_dc_preobrazovateli/generator_na_ehlemente_peltje/16-1-0-30
10. Л.И. Анатичук, В.Я. Михайловский, Л.Т. Струтинская, И.Ю. Лудчак, Наука и инновация (Украина) **5**, № 5, 34 (2009).

11. Э. Ред. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. Пер. с немецкого (Москва, Мир, 1990).
12. А.С. Власов, В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина и др., ФТП **44**, 1284 (2010).
13. A.G. Imenes and D.R. Mills. In Proceedings of Solar 2002 (Australian and New Zealand, Solar Energy Society, pp. 1–7).
14. Y. Li, S. Witharana, Hui Cao, M. Lasfargues, Yun Huang, Y. Ding, Particuology **11** (2013) http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2013.08.003.
15. D.J. Yang, Z.F. Yuan, P.H. Lee, H.M. Yin, International Journal of Heat and Mass Transfer **55**, 1076 (2012).
16. Forbes Solar - Solar Cogeneration System, http://www.forbesmarshall.com/solar_cogeneration.aspx.
17. M. Fisac, F.X. Villasevil, A.M. López, Journal of Power Sources **252**, 264 (2014).
18. T. Liao, B. Lin, Z. Yang, International Journal of Thermal Sciences **77**, 158 (2014).
19. А.М. Касымахунова, М. Набиев, Письма в ЖТФ **29**, 76 (2003).
20. G. Abdurakhmanov, R.A. Zakhidov, G.S. Vakhidova, S.A. Mamatkulova, Applied Solar Energy **46**, No.3, 169 (2010).
21. S.K. Yee, S. LeBlanc, K.E. Goodson, C. Dames, Energy Environ. Sci. **6**, 2561 (2013).
22. В.П. Ефимов, Физическая инженерия поверхности **8**, № 2, 100 (2010).
23. Dario Narducci, Applied Physics Letters **99**, 102104 (2011); doi: 10.1063/1.3634018.
24. Ш.И. Клычев. Автореферат дисс. … докт. техн. наук (Ташкент, ФТИ АН РУз, 2004).