

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.472

Л.И. Кныш, канд. техн. наук, доц.,
В.А. Габринетц, д-р техн. наук, проф.

Днепропетровский национальный университет
им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина
e-mail: lknysh@ukr.net

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОФОТОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

L.I. Knysh, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
V.A. Gabrinets, Dr. Sci. (Tech.), Professor

Oles Gonchar Dnepropetrovsk National University,
Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: lknysh@ukr.net

ASSESSMENT OF PVT-TECHNOLOGY EFFICIENCY IN COMBINED SOLAR POWER PLANTS

Для повышения энергетических показателей солнечных электростанций предлагается использовать комбинированный термофотоэлектрический цикл с высокотемпературными арсенид-галлиевыми солнечными элементами и концентраторами солнечного излучения. Охлаждение таких солнечных элементов осуществляется теплоносителем, который является рабочим телом паротурбинного цикла.

Цель. Определить количественные показатели эффективности комбинированного термофотоэлектрического цикла, а также температурные уровни системы, при которых такие показатели будут максимальными.

Методика. В основу методики положено исследование функции суммарного КПД комбинированного цикла, а также анализа её первых и вторых производных. Функция суммарного КПД строилась на основе аппроксимации результатов экспериментальных исследований арсенид-галлиевых солнечных элементов с использованием аналитических зависимостей для термодинамического цикла Ренкина.

Результаты. Получены значения эффективности комбинированных термофотоэлектрических станций при использовании однопереходных и гетероструктурных солнечных элементов. В качестве теплоутилизующего цикла в таких станциях рассматривался классический паротурбинный цикл.

Научная новизна. На основе приведенной методики впервые выявлены уровни температур системы приёма солнечного излучения, способные обеспечить оптимальные показатели эффективности комбинированного преобразования, а также найдены количественные значения КПД такого преобразования.

Практическая значимость. Предлагаемый метод определения оптимальных показателей эффективности может быть применен при проектировании систем приёма перспективных термофотоэлектрических станций, а также других систем преобразования с подобным тепловым циклом.

Ключевые слова: *солнечные элементы, концентратор, паротурбинный цикл, КПД, комбинированный цикл, термофотопреобразование, альтернативная энергетика*

Введение. Промышленное производство „солнечного“ электричества в Украине представлено кремниевыми солнечными станциями. Выбор такого преобразования связан с тем, что Украина имеет примеры создания фотоэлектрических станций (ФЭС) полного цикла. Запорожский завод полупроводников способен производить до 4000 тонн поликристаллического кремния в год, что полностью может удовлетворить потребности солнечной энергетики в этом виде сырья.

Модульный принцип комплектации фотоэлектрических панелей позволяет построить ФЭС практически любой мощности. Пилотный проект такой станции был реализован в с. Родниковое Симферопольского района Крыма. Мощность станции не превышала 7,5 МВт, но её надёжное и бесперебойное функционирование позволило перейти к реализации более масштабных проектов в этой сфере. В октябре 2011 года завершилось строительство 80-мегаваттной ФЭС в с. Охотниково (Сакский район АР Крым). После выхода на проектную мощность станция производит

100 000 МВт-часов электроэнергии в год, что достаточно для энергообеспечения 20 000 домашних хозяйств. Это особенно актуально в районах Крымского полуострова, где существует острая потребность в „чистой“ электроэнергии, особенно в летний период.

Вслед за станцией в Охотниково, в январе 2012 годы начал функционировать в составе пяти очередей солнечный парк „Перово“ (Симферопольский район АР Крым) мощностью 100 МВт. Согласно открытым источникам „Перово“ стал крупнейшим действующим фотоэлектрическим парком в мире по показателю установленной мощности [1]. За ним следует канадская электростанция Sarnia (97 МВт), итальянская Montalto di Castro (84,2 МВт) и немецкая Finsterwalde (80,7МВт). Примечательно, что замыкает мировую пятёрку крупнейших ФЭС проект „Охотниково“.

На данном этапе развития мировой фотовольтаики использование моно- и поликристаллического кремния в качестве основы для солнечных батарей себя оправдывает. Данная технология является доминирующей при производстве солнечных элементов (СЭ) для станций малой и средней мощности и по прогнозам экспертов останется таковой на протяжении следующих 10–15 лет [2].

Однако дальнейшее наращивание мощностей затруднено из-за высокой стоимости кремневых солнечных батарей (3–4 \$ за 1Вт), низкого КПД такого преобразования (около 15%), вывода из оборота значительных земельных площадей, а также существующей проблемы коммутации и сопряжения элементов системы.

Очевидно, существует максимальный уровень наращивания мощности таких станций, после которого их эксплуатация становится нерентабельной. Существенные затраты финансовых и земельных ресурсов могут оказаться экономически нецелесообразными как с точки зрения энергетической эффективности, так и с точки зрения окупаемости подобных станций.

Не решит эту проблему и использование тонкоплёночных СЭ, эффективность которых ещё ниже. Такие батареи значительно дешевле традиционных (около 2–2,5\$ за 1Вт), но из-за низкого КПД они могут использоваться лишь в тех случаях, когда существуют ограничения по стоимости установки, но отсутствуют по земельным ресурсам. Площадь земельных участков под такие станции увеличивается в 2–2,5 раза.

Существенно повысить эффективность фотоэлектрических систем, снизив их стоимость и минимизировав земельные площади станций, можно за счёт использования установок на основе СЭ из арсенида галлия (GaAs) или гетероструктурных каскадных солнечных элементов из полупроводниковых материалов (GaInP, GaInAs, Ge) с концентраторами солнечного излучения. В таких СЭ работает так называемый теплофотовольтаический эффект, при котором не снижается эффективность СЭ под действием концентрированных солнечных потоков в 100 и выше раз и высоких температурных напряжениях. При облучении таких полупроводников потоком концентрированного

солнечного излучения проявляется ряд положительных свойств, а именно: возрастает время жизни возбуждённых электронов, что снижает процессы рекомбинации; возрастает объёмное поле ЭДС Дембера, которое порождает „объёмный фотоэффект“; уменьшается внутреннее поле омических потерь (потери растекания) [3]. Кроме перечисленных выше „полезных свойств“, рост эффективности СЭ связан с физическими свойствами материалов на основе GaAs, в частности, с увеличением в них „полезной“ доли солнечного спектра, способной генерировать электрический ток.

Использование солнечных батарей с высокотемпературными концентраторами неизбежно связано с проблемой охлаждения СЭ, причём тепло, что утилизируется при этом, можно использовать для дальнейшего преобразования в паросиловом цикле. Таким образом, в одной энергетической установке предлагается использовать два типа преобразования – фотоэлектрическое и термодинамическое [4].

Постановка задачи. Совмещение фотоэлектрического и термодинамического способа преобразования даёт существенный прирост КПД энергетической установки за счёт его ассоциативного характера, в отличие от других типов преобразования с коммутативным характером КПД. Однако при определении КПД термофотоэлектрического преобразования возникает проблема существенной зависимости значения этого КПД от температурного режима комбинированной системы. Это связано с тем, что КПД фотопреобразования с ростом температуры падает, в то время как КПД термодинамических циклов растёт. Очевидно, существует оптимальный температурный уровень энергоустановки, способный обеспечить максимальное значение эффективности. Метод определения такого температурного режима и является целью данной работы.

Изложение основного материала. Метод определения оптимального температурного режима комбинированной термофотоэлектрической установки базируется на аппроксимации результатов экспериментальных исследований и анализе известных аналитических зависимостей.

Выражение для суммарного КПД комбинированной энергосистемы, с учётом оптического и теплового КПД зеркально-концентрирующей системы, имеет вид

$$\eta_{\Sigma}(T) = (\eta_{фэл}(T) + (1 - \eta_{фэл}(T)) \cdot \eta_{т}(T)) \eta_{от},$$

где $\eta_{фэл}(T)$ – доля поглощённого СЭ потока солнечного излучения, преобразованного в электричество; $1 - \eta_{фэл}(T)$ – доля сбросной теплоты СЭ, утилизируемой тепловым двигателем с электрогенератором; $\eta_{т}(T)$ – суммарный термодинамический КПД паросилового цикла; $\eta_{от}$ – оптический КПД концентрирующей системы.

Нахождение оптимального значения по температуре функции $\eta_{\Sigma}(T)$ предполагает равенство нулю первой производной в точке максимума, вторая производная при этом должна быть меньше нуля. Без по-

тери общности значение оптического КПД установки можно принять $\eta_{оп} = 1$. Тогда формула для определения суммарного КПД примет вид

$$\eta_{\Sigma}(T) = \eta_{фэл}(T) + (1 - \eta_{фэл}(T)) \cdot \eta_T(T).$$

Первый этап предполагает нахождение аппроксимирующего полинома для функции $\eta_{фэл} = \eta_{фэл}(T)$. Данные об эффективности GaAs СЭ в потоке концентрированного солнечного излучения и температурного диапазона 100–200⁰С малочисленны и, в значительной мере, противоречивы.

Ранние работы, посвящённые экспериментальному определению КПД монокристаллических (однопереходных) GaAs СЭ, проведённые в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук, показали незначительный спад эффективности при увеличении температур до 200⁰С и концентраций до 100 раз. Эти данные были аппроксимированы линейной зависимостью значений эффективности от температуры.

В последнее время произошли существенные усовершенствования гетероструктуры и изменения в технологии изготовления GaAs СЭ, что позволило значительно повысить их эффективность. Эти усовершенствования связаны, главным образом, с созданием переходной *i*-зоны между *p*- и *n*-зонами полупроводника. Создание такой тонкой зоны в структуре СЭ приводит к существенному улучшению его энергетических характеристик и формирует так называемую энергетическую модуляцию. Сущность модуляции состоит в неравномерном введении в *i*-слой металлорганических соединений методом молекулярной эпитаксии при изготовлении кристалла. Эти присадки подбираются так, чтобы потенциальная картина *p-n*-перехода была в виде двух-трёх резких пиков и провалов вблизи уровня Ферми. Тем самым добиваются беспрепятственного движения электронно-дырочного газа через потенциальный барьер *p-n*-перехода. Не вдаваясь в тонкие вопросы технологии изготовления СЭ, следует отметить, что *i*-слой по своему характеру является обеднённым, концентрация носителей в нём примерно в 100 раз меньше, чем в *p*- и *n*-зонах. Тем не менее, наличие такого слоя существенно повышает эффективность поглощения фотонов, что способствует генерации фотоэлектронов и, в конечном счёте, повышению КПД прямого фотопреобразования.

В [5] представлены результаты экспериментов по облучению лабораторных образцов усовершенствованных GaAs СЭ потоком концентрированного излучения при $K_S=100$. Эффективность таких СЭ достигала 27–33% для наземного солнечного спектра. Эти экспериментальные данные были аппроксимированы квадратичным полиномом.

К сожалению, исследования ограничивались областью температур в 200–230⁰С. Проведение дальнейшей экстраполяции в область более высоких температур было бы ненадёжным. Очевидно, что зависимость эффективности КПД GaAs СЭ от температу-

ры $\eta_{фэл} = \eta_{фэл}(T)$ при более высоких температурных показателях является предметом отдельного изучения, требующим тщательной экспериментальной проверки.

Второй этап исследования включал в себя нахождение температурной зависимости КПД циклов Ренкина η_T и Карно η_K . Зависимость эффективности цикла Ренкина от температуры выражалась аналитически с использованием числа Клаузиуса Cl , причём при $Cl \rightarrow \infty$ КПД цикла Ренкина с насыщенным паром асимптотически стремится к циклу Карно $\eta_T \rightarrow \eta_K$ [6]. Необходимо отметить, что для циклов с перегретым паром и при применении регенерации таких простых аналитических выражений не существует, и функция $\eta_T = \eta_T(T)$ также должна быть аппроксимирована каким-либо полиномом $y = f(T^n)$.

На третьем этапе расчёта проводилось исследование функции суммарного КПД $\eta_{\Sigma}(T)$ и её производных после подстановки в выражение для суммарного КПД аппроксимирующих полиномов $\eta_{фэл} = \eta_{фэл}(T)$ и $\eta_T = \eta_T(T)$. Такое исследование позволило найти оптимальную температуру, обеспечивающую максимальную эффективность рассматриваемой энергосистемы.

При использовании простейшей линейной аппроксимации становится возможным, после проведения анализа поведения функции суммарного КПД и её производных, получить аналитические выражения для оптимального значения температуры энергетической установки.

Выражение для суммарного КПД, при использовании более точной квадратичной аппроксимации температурной зависимости СЭ, имеет вид

$$\eta_{\Sigma} = aT^2 + bT + c + \frac{(T - T_0)(1 - aT^2 - bT - c)}{(1 + \frac{1}{Cl})T - \frac{1}{Cl}T_0},$$

где T_0 – верхняя температура цикла; a , b и c – коэффициенты аппроксимирующего многочлена.

Производная такой функции будет иметь в числителе третью степень температуры, что не позволяет получить аналитическую формулу для $T_{опт}$. В общем случае уравнение решается численно, при этом равенство нулю знаменателя выражения – очевидно.

На рисунке представлены варианты кривые суммарного КПД комбинированного термофотопреобразования, построенные на основе проведенного анализа.

На графике показаны также зависимости эффективности однопереходных и гетеропереходных GaAs СЭ от температуры, а также температурные зависимости КПД циклов Ренкина и Карно.

Кривая, пологий максимум которой соответствует эффективности в 50–52%, построена для термодинамического цикла Ренкина в предположении, что в комбинированном преобразовании используются высокоэффективные гетеропереходные GaAs СЭ, КПД

которых мало снижается при росте температуры. Вторая кривая для суммарного КПД, с наличием максимума в 42–44%, соответствует термодинамическому циклу Ренкина с однопереходными монокристаллическими GaAs СЭ, КПД которых, по данным лабораторных исследований, падает значительно. Однако промышленная технология изготовления СЭ такого типа достаточно хорошо апробирована, в то время как высокоэффективные СЭ пока ещё находятся в стадии интенсивной разработки.

На рисунке показана температурная зависимость для цикла Карно, в котором в качестве рабочего тела используется вода. Следует заметить, что при $T \rightarrow \infty$ данная кривая является асимптотой, к которой стремятся значения суммарного КПД.

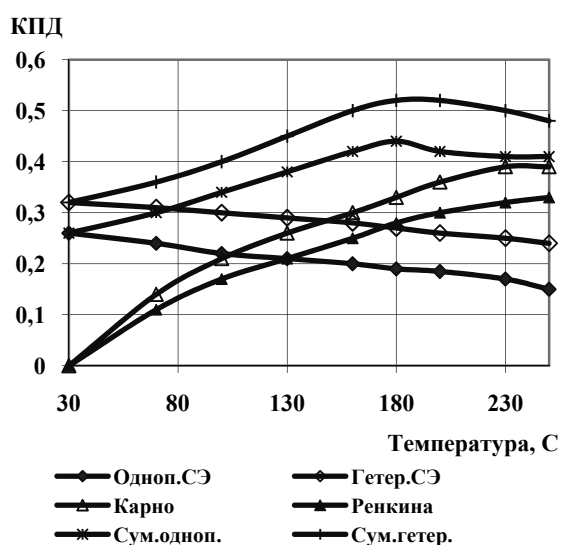


Рис. Зависимости КПД фотопреобразования, термодинамического цикла, а также комбинированного термофотоэлектрического цикла от температуры

Анализ полученных результатов. В ходе проведенного исследования удалось определить количественные показатели эффективности комбинированного термофотоэлектрического цикла, которые даже при использовании СЭ с низким КПД превышают 40%. Расчёт проводился для классического цикла Ренкина с насыщенным водяным паром без использования промежуточного перегрева пара, регенерации и пр. Для такого простейшего случая максимум эффективности в 44% соответствует температуре в 170–190°C и является вполне реальным значением для существующих сегодня теплотехнических и электротехнических устройств.

С увеличением допустимой температуры для полупроводниковой элементной техники, связанной с широким промышленным освоением гетеропереходных СЭ, появится возможность достижения реально-го КПД в 50% и выше. Температурный режим установки при этом может варьироваться в более широких пределах от 160 до 220°C, что даёт дополнитель-

ные возможности при выборе её динамических, энергетических и геометрических показателей, а также типа теплоносителя.

Существенный прирост суммарного КПД в 5–6% могут дать и всевозможные традиционные теплотехнические мероприятия, которые увеличивают эффективность термодинамического цикла Ренкина.

Немаловажным можно считать и экспериментально обнаруженный факт, который свидетельствует о том, что действительные показатели комбинированного цикла несколько выше теоретически вычисленных. Впервые такой эффект был обнаружен при исследовании солнечных коллекторов, на поверхности которых были укреплены СЭ. Preiffer Heinz на основе многочисленных натуральных экспериментов вывел эмпирическую зависимость „добавки“ КПД $\Delta\eta$, которая прибавляется в общем балансе КПД. Эта добавка составляла 5%. Эксперимент проводился с использованием кремниевых СЭ, причём температурный уровень установки находился в интервале от 30 до 150°C. При такой температуре КПД кремниевых СЭ существенно снижался, а общая эффективность комбинированного термофотоэлектрического цикла росла, причём на графике наблюдался явный максимум при температуре поверхности коллектора в 95–120°C.

Очевидно, что применение GaAs позволит расширить температурный предел до +250°C вследствие его более высокой термостойкости по сравнению с кремнием. Конечно, эксперимент, результаты которого описаны выше, носит частный характер, однако он подтверждает факт наличия экстремума КПД комбинированного цикла, полученный теоретически.

Основные выводы. Проведенное теоретическое исследование, которое базируется на результатах экспериментальных данных, позволило выяснить качественные и количественные показатели эффективности комбинированного термофотоэлектрического преобразования, которое считается перспективным для использования в солнечных энергетических установках различного назначения и мощности. Доказано, что по мере совершенствования фотоэлектрического и теплотехнического оборудования, КПД таких систем может достигать 50% и выше, что значительно превосходит показатели эффективности ныне действующих систем преобразования энергии Солнца.

Список литературы / References

1. В Крыму построена самая мощная солнечная электростанция в мире [Электронный ресурс] // Центр журналистских расследований. – Режим доступа до ресурсу: <http://investigator.org.ua/news/28638>
- Center for Investigative Journalism, (2011), “The most powerful solar power plant in the world was built in Crimea”, available at: <http://investigator.org.ua/news/28638> (accessed December 4, 2012).
2. Безручко К.В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии / К.В. Безручко, С.В. Губин. – Харьков: ИЦ ХАИ, 2007.– 310 с.

Bezruchko, K.V. and Gubin, S.V. (2007), *Avtonomnye nazemnye energeticheskie ustanovki na vozobnovlyaemykh istochnikakh energii* [Autonomous Ground Power Systems for Renewable Energy], ITS KNAI, Kharkov, Ukraine.

3. Алферов Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т.38. – №8. – С. 937–948.

Alferov, Zh.I., Andreev, V.M. and Romyantsev, V.D. (2004), “Trends and prospects of solar photovoltaic’s”, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, Vol.38, no.8, pp. 937–948.

4. Васильев В.А. Расчётные технико-экономические характеристики солнечных комбинированных фототермодинамических энергоустановок / В.А. Васильев, Б.В. Тарнижевский // Известия РАН. Энергетика. – 2005. – №3. – С. 148–156.

Vasilyev, V.A., Tarnizhevskiy, B.V. (2005), “Design technical and economic characteristics of combined photothermal dynamic solar power plants”, *Izvestiya RAN. Energetika*, no.3, pp. 148–156.

5. Андреев В.М. Многослойные AlGaAs/GaAs гетероструктуры солнечных элементов для концентрирующих модулей / В.М. Андреев, В.П. Хвостиков, В.Р. Ларионов // Труды 12-й Европейской фотовольтаической солнечно-энергетической конференции. Амстердам, 11–12 апреля. – Амстердам, 1994. – С. 1401–1404.

Andreev, V.M., Khvostikov, V.P. and Larionov, V.R. (1994), “Multilayer AlGaAs/GaAs heterostructure solar cells for concentrator modules”, *Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam, April 11–12, 1994, Amsterdam, James and James Science Publishers, pp. 1401–1404.

6. Карташов Э.М. Техническая термодинамика / Э.М. Карташов, В.А. Кудинов. – М.: Высшая школа, 2000. – 261 с.

Kartashov, E.M. and Kudinov, V.A. (2000), *Tekhnicheskaya termodinamika*, [Engineering Thermodynamics], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

Для підвищення енергетичних показників сонячних електростанцій пропонується використовувати комбінований термофотоелектричний цикл із високотемпературними арсенід-галієвими сонячними елементами та концентраторами сонячного випромінювання. Охолодження таких сонячних елементів здійснюється теплоносієм, що є робочим тілом паротурбінного циклу.

Мета. Визначити кількісні показники ефективності комбінованого термофотоелектричного циклу, а також температурні рівні системи, при яких такі показники будуть максимальні.

Методика. В основу методики покладено дослідження функції сумарного ККД комбінованого циклу, а також аналізу її перших та других похідних. Функція сумарного ККД будувалась на основі апроксимації результатів експериментальних досліджень арсенід-галієвих сонячних елементів з використан-

ням аналітичних залежностей для термодинамічного циклу Ренкіна.

Результати. Отримані значення ефективності комбінованих термофотоелектричних станцій з використанням одноперехідних та гетероструктурних сонячних елементів. В якості теплоутилізуючого циклу в таких станціях розглядався класичний паротурбінний цикл.

Наукова новизна. На основі наведеної методики вперше визначено рівні температур системи прийому сонячного випромінювання, що забезпечують оптимальні показники ефективності комбінованого перетворення, а також знайдено кількісні значення ККД такого перетворення.

Практична значимість. Запропонований метод визначення оптимальних показників ефективності може бути застосований під час проектування систем прийому перспективних термофотоелектричних станцій, а також інших систем перетворення з подібним тепловим циклом.

Ключові слова: сонячні елементи, концентратор, паротурбінний цикл, ККД, комбінований цикл, термофотоперетворення, альтернативна енергетика

Combined PVT-cycle with gallium-arsenide high-temperature solar cells and solar radiation concentrator is proposed to increase the energy performance of solar power plants. Cooling of the solar cells is carried out by means of the coolant which is the cycle fluid of the steam turbine cycle.

Purpose. To determine the quantitative indicators of combined PVT-cycle. Temperatures providing high efficiency must be found.

Methodology. The research was conducted based on analysis of the function of the overall efficiency of the combined cycle and analysis of its first and second derivatives. The function of the overall efficiency was constructed using the approximation of experimental research for gallium-arsenide solar cells and analytical relationships for the thermodynamic Rankine cycle.

Findings. The values of efficiency of combined PVT-power plants with unijunction and heterostructure solar cells were received. The waste heat was used in classic steam turbine cycle.

Originality. The methodology allows us to determine, for the first time, the temperature of the solar radiation receiving system, which provides optimal combined conversion performance indicators. The quantitative values of efficiency of combined PVT-cycles were found.

Practical value. The method determining the optimal efficiency indicators can be applied when designing the reception systems of prospective PVT-power plants and other systems with similar thermal conversion cycle.

Keywords: solar cells, concentrator, steam turbine cycle, system effectiveness measure, combined cycle, PVT-technology, alternative energetics

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Ю.В. Куваєвим. Дата надходження рукопису 03.12.12.