

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В.В. Юрко, Ю.В. Шкиль

*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины («Трансмаг»)***СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА: ПРОБЛЕМИ І РІШЕННЯ**

Наведено огляд сучасних напрямків наукових досліджень і практичних досягнень у галузі сонячної енергетики. Розглянуто можливість використання цих досягнень для практичного вирішення енергетичної проблеми в Україні. Концептуально розглянуто можливість створення на сучасному етапі гібридних електроенергетичних систем.

Ключові слова: фотоелектричні перетворювачі, гібридні електроенергетичні системи.

V.V. Yurko, Yu.V. Shkil

*Institute of transport systems and technologies NAS of Ukraine***SOLAR POWER: PROBLEMS AND DECISIONS**

The survey of present trends of scientific and practical achievements in the field of solar energy is made. The possibility of using of these achievements in practical decisions of the energy problem in Ukraine is considered. The possibility of creation of hybrid in the present is considered conceptually.

Key words: solar energy, electro-energetic systems, Ukraine.

По прогнозам Мирового энергетического совета (WEC) за предстоящие 25 лет будет построено и введено в эксплуатацию больше энергетических мощностей, чем за прошедшее столетие. В настоящее время во всем мире в эксплуатации находятся более 5000 ГВт энергогенерирующих мощностей. Из них на теплоэлектростанциях (ТЭС) вырабатывается 75% электроэнергии, на гидроэлектростанциях (ГЭС) – около 20% и на атомных электростанциях (АЭС) – порядка 5% (349 ГВт) (Розанов, 1984).

Бурное развитие энергетики в XX столетии породило проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды, вызванные двумя факторами:

– использованием энергетических ресурсов планеты;

– влиянием на окружающую среду производства и потребления энергии, приводящим к ухудшению глобального климата планеты.

Основными загрязнителями являются транспорт, ТЭС и промышленность, которые вместе дают около 80% выбросов в атмосферу вредных веществ. Замена способов генерации энергии в первую очередь в этих областях позволит существенно повлиять на улучшение глобального климата планеты.

Во многих странах мира проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по расширению сферы использования возобновляемых источников энергии: солнечной, геотермальной, ветровой, приливной и других, запасы которых практически неисчерпаемы.

Возобновляемые источники энергии вполне могут обеспечить любой рост потребления энергии человечеством, как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу (см. табл. 1) (Рамад Фр., 1981).

Особое внимание ученых и инженеров привлекает непосредственное преобразование солнечной радиации в электрическую или тепловую энергию.

За прошедшие более 40 лет исследовательских работ учеными и инженерами созданы высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной радиации, которые обеспечили прорыв в области создания фотоэлектрических систем (ФЭС) для индивидуального и коммерческого применения.

6 - 10 июня 1998 г. в Вене (Австрия) состоялась самая крупная из проводившихся ранее встреча специалистов в области ФЭС – II Всемирная конференция по технологии фотоэлектрических систем, в которой приняли участие 120 фирм из разных стран мира, работающих в области фотоэлектричества. Их сотрудники представили на конференцию 1100 докладов.

В заключительном докладе член Европейской комиссии, доктор Пальц (Palg) заявил, что «фаза разработок ФЭС закончилась 2 года тому назад и теперь можно ожидать появления крупных предприятий по их изготовлению в объеме 10÷30 МВт/год...».

На XVII конгрессе World Energy Consil «Energy and Technol World Den Next Millenium» отмечено ежегодное расширение рынка ФЭС на 20 %. Стоимость фотоэлектрической энергии в настоящее время составляет 0,3÷0,5 дол/кВт·ч, что все еще сдерживает широкое использование фотоэлектричества.

Таблица 1

Показатель мощности неисчерпаемых источников	
Вид энергии	Мощность
Солнечная радиация, достигающая Земли	$178 \cdot 10^{12}$ кВт
Геотермизм	$32 \cdot 10^9$ кВт
Приливы и отливы, ветер	$3 \cdot 10^9$ кВт

В ближайшее время за счет освоения новых технологий, повышения эффективности ФЭП и увеличения объемов мирового производства до уровня 500 МВт и более в год можно ожидать, что цены на фотоэлектричество снизятся на треть.

Состояние развития фотоэнергетики. По данным отраслевого союза UVS (г. Берлин, Германия) в настоящее время суммарная мощность действующих установок в мире превышает 1000 МВт.

Производители ФЭС в мире: США – 40%, Европа – 25%, Япония – 20% и другие страны – 15% (Storwarz.elek. pol., 1999).

Ведущие фирмы производители ФЭС: Siemens Solar GmbH (20% мировой потребности), Amoco/Enron and Solarex (США), BP Solar (Европа) и Куосего (Япония).

Многие государства объявили свои национальные программы развития работ по освоению фотоэлектричества. Так, в США такая программа получила название «1000000 солнечных крыш», на реализацию которой будет затрачено порядка 25 млрд. дол. США. Германия объявила свою программу «100000 крыш» с размещением солнечных батарей (СБ) на крышах жилых домов. По данным электротехнического общества Германии (ZVEN), Министерство экономики выделяет сроком на 6 лет 21 млрд. марок под кредиты и дотации на приобретение ФЭС, мощность каждой из них должна быть более 1 кВт. Задача реальная, так как уже в 1998 г. в Германии строились заводы для производства ФЭС, производительность которых оценивается в 263 МВт (Photovoltaic Insider's Rept., 1999).

Япония также успешно выполняет государственную программу «Новый солнечный свет». В 1998 г. в Японии удвоилась, по сравнению с Германией и США, вместе взятых, мощность введенных в действие ФЭС и составила 133,3 МВт, а к 2010 году планируется установить в жилых домах ФЭС общей мощностью ~ 5 000 МВт.

Австралия к 2010 г. планирует увеличить мощность действующих ФЭС до 4000 МВт, а за 20÷30 лет оборудовать каждый второй дом фотоэлектрической системой.

Быстро развивается фотоэнергетика в Англии, Испании, Франции, Индии, Канаде, ЮАР и других странах. Из приведенной информации следует, что сбываются прогнозы экспертов об ускоренном сценарии развития фотоэнергетики в мире.

Масштабы проводимых работ по фотоэнергетике характеризуются затратами на исследования и разработку оборудования. Так, Япония на эти цели затратила более 225 млрд. дол. США, Соединенные Штаты Америки – 65 млрд., Германия – 56 млрд., что составляет 76% всех средств, затраченных 20 государствами мира на эти цели (Sonnenerg und Warmetechn, 2000).

Правительства большинства стран создали льготные условия для проведения исследований, разработки технологий, производства и установки фотоэлектрических систем у потребителей.

Производители ФЭС в настоящее время гарантируют безопасную и надежную работу этих систем на протяжении не менее 25 лет (Elektronechn. und Informationstechn, 1999).

По прогнозам экспертов при таких масштабах и темпах работ по фотоэнергетике возобновляемая энергия, особенно солнечная, будет доминировать в производстве энергии уже к 2050 году.

Достижения в разработке ФЭП. Д-р Мартин Грин (университет Нового Южного Уэльса, Австралия) сделал сообщение о достижениях по созданию солнечных элементов (СЭ) на основе монокристаллического кремния с КПД 24,4%, СЭ на основе поликристаллического кремния с КПД 19,8%, а также о разработке фотоэлектрических модулей (ФЭМ), КПД которых достигнет 22,7%.

В Германии (г. Фрайбург) разработан новый тип СЭ с КПД 31%. Каскадный СЭ состоит из элемента на основе GaAs, преобразующего видимое излучение, и элемента на основе GaSb, преобразующего инфракрасное излучение. Институт рассчитывает с помощью каскадного СЭ, состоящего из 3-х элементов, достичь КПД 35 %.

В России исследовано влияние на фотоэлектрические характеристики кремниевых СЭ нанесенных на их поверхность тонких слоев жидких диэлектриков (глицерин, ацетон, изопропиленовый спирт, бутанол, диоксан, деионизированная вода). Показано, что их наличие уменьшает прямые и обратные токи, существенно повышает ток короткого замыкания и напряжение холостого хода и значительно повышает КПД (до 40–60%). Предложена физическая модель явления.

В 1998 – 2000 гг. Исследовательский центр Глена (NASA), фирмы ENTECH, AECABLE и Институт космической энергетики разработали и реализовали новую концепцию и технологию изготовления солнечных фотоэлектрических энергоустановок с концентраторами (СФЭУ), которые получили название SLA (Stretched Lens Array), с улучшенными характеристиками и КПД 29,6% (Photovoltaic ..., 1998).

Большое внимание уделяется гетероструктурным ФЭП. Так, на фирме Applied Solar Energy Corp. (ASEC), являющейся одним из основных производителей солнечных батарей (СБ), доля гетероструктурных СБ в 1997 г. составила ~ 80 %.

Рекордное значение КПД достигнуто для монокристаллических ФЭП – 25 % и 30% – для каскадных механически стыкованных ФЭП.

Фирма EEV, ведущий европейский производитель ФЭП для космоса, на основе GaAs предлагает СБ с КПД 24,0 %.

Дальнейшее совершенствование структуры ФЭП и повышение эффективности позволит достигнуть КПД 27÷30 %.

NREL (National Renewable Energy Laboratory) разработала тонкопленочные СЭ на основе теллурида кадмия, модифицировала структуру, создав СЭ Cd/CdTe на основе поликристаллических пленок с КПД 16,4%, что является высоким достижением для СЭ этого типа. Ученым NREL удалось разработать пленочные СЭ на основе диселенида индия и меди и достичь КПД 18,8%, что является наивысшим показателем для СЭ данного типа (Photovoltaic ..., 1998).

К 2010÷2020 годам эффективность различных типов СЭ, которые будут выпускаться на промышленном уровне, может увеличиться в 1,5÷2,0 раза.

В настоящее время единственным тонкопленочным солнечным элементом (ТПСЭ), выпускаемым на промышленном уровне, является СЭ из a-Si с одним или несколькими переходами. Многопереходный вариант является предпочтительным, так как *в этом случае встроенное поле оказывается достаточным для почти полного исключения световой деградации* (Indian J. Pure and Appl. Phys. – 1996. – 34, № 9).

Заметно растет объем производства СБ из аморфного кремния для применения в наземных условиях, увеличивается их КПД и долговечность (более 25 лет).

Два основных показателя обуславливают привлекательность ФЭП из аморфного кремния:

– малая оптимальная толщина фотоактивного слоя, что значительно снижает расход дорогостоящего «солнечного кремния»;

– тонкопленочная технология нанесения a-Si на подложки большой площади из паровой фазы с высокой скоростью осаждения.

Отсутствие у a-Si упорядоченной структуры позволяет осаждать его на подложки из недорогих материалов, способных выдерживать воздействие повышенной температуры (250÷350°C). Перечисленные достоинства ФЭП из a-Si ставят их вне конкуренции при применении в ФЭС большой мощности.

Наземные испытания ФЭП из a-Si на подложке из нержавеющей стали показали устойчивость к термоциклированию и отсутствие температурной зависимости электри-

ческих характеристик ФЭП при температуре $0 \pm 100^\circ\text{C}$, а также устойчивость к радиационному воздействию (деградация менее 5% за 15 лет пребывания на геостационарной орбите – ГСО. Степень деградации существенно зависит от параметров орбиты космических аппаратов (КА). Так, для низкоорбитальных КА деградация СБ на основе монокристаллического кремния и гетероструктур GaAlAs/GaAs составляет соответственно 15% и 5 % в течение 5 лет пребывания на орбите. Для КА на ГСО деградация СБ равна 31% (Si) и 16% (GaAs) в течение 15 лет эксплуатации на орбите. Для радиационно опасных орбит (7400 км) деградация СБ составляет 49% (Si) и 22 % (GaAs) в течение 5 лет пребывания на орбите. К концу срока эксплуатации суммарная деградация от различных факторов для кремниевых ФЭП оценивается как 40% на низких орбитах и 44% на ГСО (Коротеев и др., 2001).

United Solar Systems Corp. (USS) объявила о том, что выпускаемые ею сверхлегкие ФЭМ с трехпереходными СЭ были установлены на КС «МИР». В настоящее время закончились летные испытания и исследования ФЭМ на возможность использования их в разных аспектах космического применения. Телеметрические данные, которые поступали с борта КС, подтвердили прогнозируемые параметры ФЭМ.

Новые контракты. В рамках программы разработки и совершенствования новых технологий *промышленного изготовления фотоэлектрических систем*, осуществляемой под руководством NREL и финансируемой министерством энергетики США, заключено 11 контрактов на ~ 60 млн. дол. США. Долевое участие субконтрактных организаций составляет 48%. На исследования, связанные с использованием в качестве материала СЭ кристаллического кремния, приходится 41% затрат, на аморфный кремний – 26%, CdTe – 13% и 9% на разработку ФЭС с концентраторами. Среди участников программы американские фирмы Astro Power, Energy Conversion Devices, Siemens Solar, Solarex и другие. Эти работы проводятся в обеспечение крупносерийного производства фотоэлектрических систем в США. Основная задача этих работ – повышение эффективности и долговечности ФЭС (см. табл. 2). В табл. 2 приводятся достижения фирм-производителей ФЭП и используемые ими конструкции ячеек.

Таблица 2

Уровень эффективности преобразования, %		
Конструкция ячейки	Эффективность	Фирма
Однопереходная	9,2	Юнисолар, США
	9,1	ТТТ, Япония
	8,9	Саньё, Япония
	8,5	АРС, США
	7,3	Утрехт, Нидерланды
Двухпереходная с одинаковыми запрещенными зонами	10,1	Юнисолар, США
	9,2	Джулих, Германия
	9,0	Рим, Италия
	8,7	Кьюинд Хии Унив., Корея
	8,3	Нюшаталь, Швейцария
Двухпереходная с двойной запрещенной зоной	11,2	Юнисолар, США
	10,6	Саньё, Япония
	9,6	Соларекс, США
	9,0	Кьюинд Хии Унив., Корея
Трехпереходная с многократными запрещенными зонами	8,7	Митсу Тотсу, Япония
	13,0	Юнисолар, США
	10,2	Шарп, Япония
	9,15	Соларекс, США

На рис. 1 приведены схематические диаграммы конструкций СЭ, последовательность слоев, образующих переходы, и применяемые материалы. На рис.2 показано расположение субячеек, поглощающих фотоны разных участков светового спектра для трехпереходного СЭ. На рис. 3 схематично представлен техпроцесс производства 9-слойных солнечных ячеек (элементов) непрерывным способом «накатки» (roll-to-roll) из сплава аморфного кремния. Проведем сравнительный анализ технологий, которые освоены на

промышленном уровне и могут обеспечить крупносерийное производство СБ и ФЭС. В табл. 3 приведены данные по основным потребительским свойствам продукции, изготавливаемой с использованием рассматриваемых технологий. На основании сравнения параметров (табл. 3) можно сделать заключение о том, что предпочтительнее технология «United Solar Triple Junction a-Si» на подложке из нержавеющей стали.

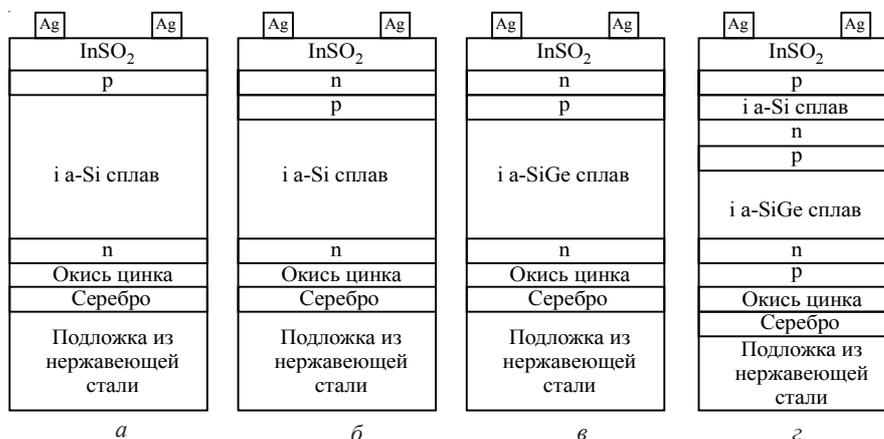


Рис. 1. Схематические диаграммы различных конструкций СЭ: а – однопереходная, б – двухпереходная с одинаковыми запрещенными зонами, в – двухпереходная с двойной запрещенной зоной, г – трехпереходная с многократными запрещенными зонами

Таким образом, исходя из сегодняшнего состояния разработок и промышленного освоения ТПСЭ из a-Si, целесообразно сделать выбор в пользу наиболее дешевых, гибких, износоустойчивых, легких фотоэлектрических модулей, в которых для оптимизации поглощения света используется трехпереходная разделяющая спектр структура. Эти, изготавливаемые по технологии UNI-SOLAR, СЭ характеризуются радиационной стойкостью, высокой (для своего класса) эффективностью преобразования энергии и стабильности работы.

Дополнительные преимущества этой технологии:

- долговечность (более 20 лет);
- малый расход дефицитного «солнечного кремния»;
- высокая радиационная стойкость (деградация ≤ 5% за 15 лет на ГСО);
- низкая потенциальная стоимость менее 1 дол. за 1Вт (при производстве более 100 МВт/год);
- возможность использования в стационарных, мобильных, морских и космических солнечных энергетических системах (СЭС);

– ECD/UNI Solar – участник программы совершенствования технологий промышленного изготовления ФЭС, осуществляемой NREL и финансируемой Министерством энергетики – признанный лидер по созданию a-Si СЭ;

Выбор технологии для крупносерийного производства (более 100 МВт/год) ФЭС.

Рассматривая потребительские свойства, приведенные в табл. 3, и дополнительные преимущества, можно сделать заключение о том, что технология United Solar’s Triple a-Si в наибольшей степени удовлетворяет серийному производству СЭС.

Стоимость оборудования для СЭС и фотоэлектрической энергии. В настоящее время фотоэлектрические системы продаются по цене 5-8 дол. США за 1 Вт установленной мощности, а отпускная цена электроэнергии 0,3-0,5 дол. США за 1 кВт·ч.

Специалисты, занимающиеся прогнозами рынка, предсказывают значительный рост рынка СЭС с пиком в ближайшие 10-15 лет. Также прогнозируется, что коммерческий фотоэлектрический рынок получит расширение в период между настоящим моментом и 2010 годом, при этом большие объемы продаж ФЭС будут предназначены для подсоеди-

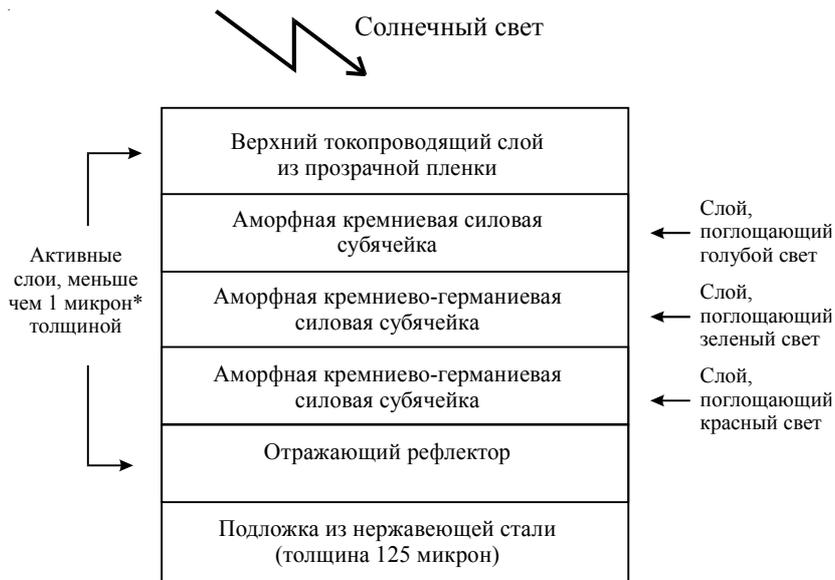


Рис. 2. Расположение субячеек, поглощающих фотоны различных участков светового спектра

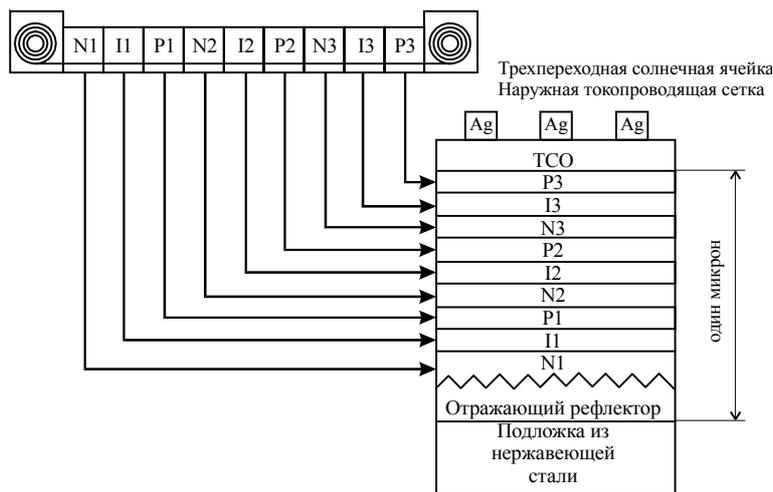


Рис. 3. Техпроцесс производства 9-слойных СЭ методом «накатки» (roll-to-roll)

динения к сети, поскольку фотоэлектрическая энергетика становится экономически конкурентоспособной с топливной энергетикой и со временем станет альтернативой ТЭС и АЭС.

Наиболее важным фактором роста фотоэлектрического рынка будет низкая цена. Эксперты пришли к консенсусу, что прорыв фотоэнергетики на рынок, используемый крупными предприятиями-потребителями, произойдет тогда, когда цены на ФЭС будут ниже 3 дол. США за 1 Вт, – цена, по которой фотоэнергетика сможет конкурировать исключительно на экономической основе с такими основными энергоносителями, как уголь, нефть и газ. Это, в свою очередь, потребует снижения стоимости производства ФЭМ до 1,00 дол. США за 1 Вт, т.е. до той стоимости, которая может быть достигнута при больших объемах производства (более 100 МВт/год).

Сравнительный анализ различных технологий

Показатель	«United Solar's Triple Junction a-Si» на подложке из нержавеющей стали	Пластина и стоимость кристаллического кремния	Аморфный кремний на стекле	CdTe	CuInSe ₂
Стоимость (\$/W _p)	3-5 \$ /W _p	3-5 \$ /W _p	3-5 \$ //W _p	Данные отсутствуют	Данные отсутствуют
Оценочная стоимость	< 1\$ / W	2 \$ / W	1,5 \$ / W	1,5 \$ / W	1,5 \$ / W
Типичный годовой выпуск (Wh / W _p)	200	160	190	180	150
Гибкость	Превосходная	Жесткая	Жесткая	Жесткая	Жесткая
Прочность	Превосходная	Хрупкая	Стекло может разбиться	Стекло может разбиться	Стекло может разбиться
Вес	Легкая	Тяжелая	Тяжелая	Тяжелая	Тяжелая
Внешний вид продукции	Превосходная эстетика для большинства применений	Плохой	Плохой	Плохой	Плохой
Экологическая чистота, безопасность для здоровья	В изделии нет токсичных материалов	Содержит свинец	В изделии нет токсичных материалов	Кадмий	Селен
Надежность	Исключительная	Исключительная	Исключительная	Не доказана	Не доказана

– при производстве СЭС не используются токсичные материалы, не загрязняется окружающая среда и, практически, не требуется обслуживание при эксплуатации.

В соответствии с бизнес-планом «100 MW Photovoltaics Manufacturing Plant, October 1998» (ECD, 1998), расчетная стоимость планируется 1,5-1,3 дол. США за 1 Вт с последующим снижением стоимости ФЭМ до 0,9-0,8 дол. за 1 Вт, при этом себестоимость энергии составит 4-6 центов за 1 кВт×час.

На рис. 4 приведен график стоимости продаж модулей и прогноз цен до 2010 года в зависимости от объема продаж.

На графике прогноз цен относительно мощных модулей показан для двух сценариев. Верхняя линия означает ценообразование под обыкновенный сценарий, нижняя под ускоренный сценарий при возрастающем спросе на ФЭС. Уклон обеих линий основывается на регрессивной модели, которая указывает на приблизительно 18% уменьшения цены за каждый удвоенный совокупный объем, а для больших модулей при продаже оптом – 22% в 2000 году и 20% – к 2005-2010 гг.

В настоящее время солнечная энергетика – это, практически, *единственный способ генерации электроэнергии, который имеет устойчивую тенденцию к снижению стоимости производства оборудования СЭС и, собственно, производимой энергии.*

Солнечные энергетические системы. В настоящее время во всем мире введено в эксплуатацию более 1 ГВт солнечных энергогенерирующих мощностей. Отмечается, что *рост рынка этих изделий превышает даже темпы роста рынка интегральных схем.* Повышенным спросом пользуются СЭС мощностью 1-5 кВт для автономного и сетевого использования. За последние годы мощность энергогенерирующих систем, использующих возобновляемые источники энергии, увеличилась в Европе на 200% (в США на 20%). Такой рост стал возможен благодаря государственной поддержке в виде грантов или

займов под низкие проценты. Размер грантов колеблется от 10 % капвложений в Англии до 90% на системы, подключаемые в центральные сети энергоснабжения, во Франции.

Положительные результаты испытаний демонстрационных СЭС большой мощности (20÷100 кВт и более) дали толчок быстрому развитию строительства больших коммерческих систем.

Так, например, СЭС мощностью 100 кВт, состоящая из 3200 модулей (ФЭМ), была установлена в г. Беверли (США, штат Массачусетс), расположенном в сложных климатических условиях, и успешно отработала более 20 лет. Тщательная проверка ФЭМ, изготовленных и установленных Solar Power Corporation, выявила, что только 7 модулей оказались неисправны вследствие вандализма. Деградация остальных модулей не превышала 8%. Неисправные модули были заменены и СЭС продолжает эксплуатироваться (Renewable ..., 2001. – 4, № 3).

Введена в эксплуатацию СЭС мощностью 1,3 МВт (г. Утрехт, Нидерланды). Эта СЭС обеспечивает 501 дом электроэнергией, удовлетворяя потребности в электроэнергии на 54 % (Renewable ..., 2001. – 4, № 2).

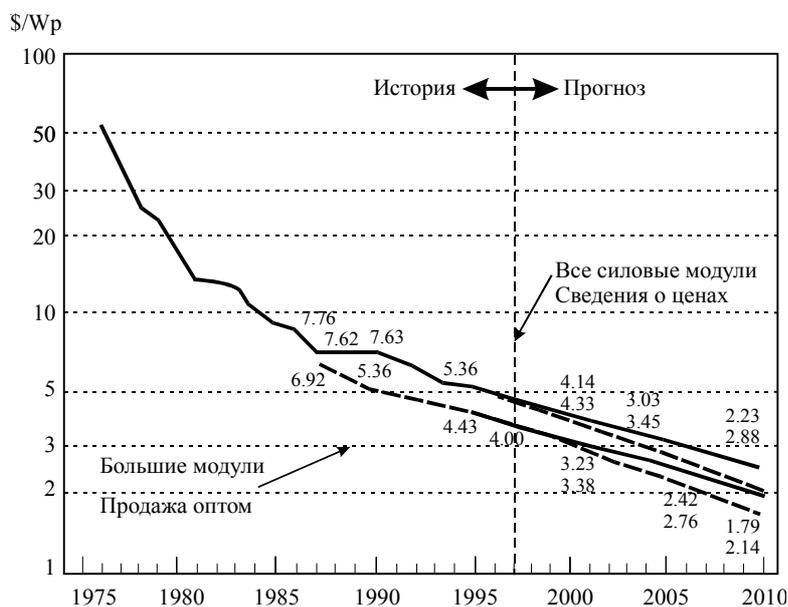


Рис. 4. Прогноз стоимости продаж модулей и прогноз цен до 2010 года в зависимости от объема продаж

Сообщается о самой крупной в мире СЭС (г. Амстердам) мощностью 2,3 МВт, состоящей из 19 тыс. ФЭМ, изготовленных Siemens Solar, которая подключена к местной коммунальной сети (Langest ..., 2001).

Еще более грандиозный проект решено осуществить в штате Невада (США). Здесь фирмы Minne Solar Corp. и Composite Power Corp. намерены построить автоматизированный завод на 100 МВт/год ФЭМ и создать СЭС установленной мощностью 100 МВт с последующим увеличением мощности этой системы до 1000 МВт, которая будет снабжать «чистой» электроэнергией штат Невада и соседние штаты на коммерческой основе (Photovoltaic ..., 1999. – 18, № 9).

Возможно, что положительные результаты испытаний в наземных условиях (20 лет эксплуатации, деградация 8%) и в космосе (15 лет на ГСО, деградация ≤ 5%), приведут к пересмотру гарантийных сроков эксплуатации СЭС в сторону увеличения их до 50 лет. Этим будет подтверждена надежность и долговечность солнечных энергетических систем по отношению к другим традиционным системам генерации электроэнергии, что будет способствовать их ускоренному развитию.

Сегодня в гарантийных обязательствах на ФЭМ фирмы–изготовители устанавливают норму снижения эффективности $\leq 1\%/год$ и срок эксплуатации ≥ 20 лет.

Автономные солнечные энергетические системы (АвСЭС). К таковым относятся системы от 500 Вт до 500 кВт, не подключенные к коммунальным или централизованным сетям электропередачи, а также мобильные СЭС и СЭС, перебазируемые на различных платформах.

Типичные сферы их применения включают в себя системы подачи воды, фермы, сельские энергетические системы, независимые производители электроэнергии, автономные объекты связи, военные объекты и некоторые малые коммунальные службы.

Автономным системам не нужно топливо (уголь, нефть, газ) и они не содержат сложных механизмов или движущихся частей, которые изнашиваются при длительной эксплуатации, эти системы не требуют профессионального обслуживания, а необходимый уход, как правило, осуществляет владелец системы.

Развертывание и ввод в эксплуатацию таких систем не требует больших капитальных вложений и трудозатрат. СЭС монтируются на жилых домах и на производственных зданиях или на простых сборных спецконструкциях. СБ в СЭС собираются из фотоэлектрических модулей, выполненных на жестких основаниях либо в виде гибких кровельных плит, перерабатывающих солнечную энергию (solar electric shingl). При монтаже СБ (в соответствии с инструкцией по эксплуатации) их ориентируют в направлении на солнце. Могут быть изготовлены и установлены СЭС с системой автоматического слежения за Солнцем. Конструктивно СЭС с системами слежения сложнее и дороже, но они позволяют за световой день выработать электроэнергии в 1,6 раза больше.

На рис. 5, а приведен типовой состав автономной СЭС, а на рис. 5, б, в, г – дополнительное оборудование, которое может входить в состав АвСЭС для повышения эффективности работы в сложных погодных условиях.

Автономная солнечная энергетическая система

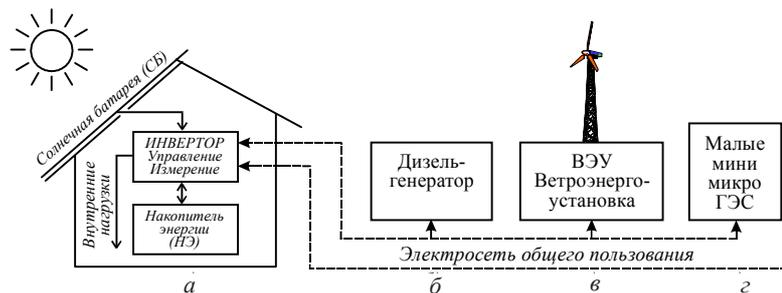


Рис. 5. Примерный состав оборудования солнечной энергетической системы

СЭС, в состав которых включено дополнительное энергогенерирующее оборудование, называют гибридными. Включая в состав АвСЭС дизель-генератор или объединяя АвСЭС и микро-, мини-, малые ГЭС, можно обеспечить круглосуточную и круглогодичную работу такой системы независимо от погодных условий.

К микро-ГЭС может быть подключено несколько десятков АвСЭС мощностью 1–3 кВт, которые образуют устойчивую высокоэффективную систему, увеличивая установленную мощность за счет солнечного фрагмента этой системы.

Включением ВЭУ в состав СЭС можно повысить эффективность такой системы примерно на 15%. При таком составе системы необходимо увеличивать емкость накопителя, так как при воздействии солнечной радиации и ветра одновременно будет происходить переполнение накопителей энергии (НЭ). В АвСЭС в этом случае необходимо предусматривать автоматическое подключение дополнительных нагрузок.

Солнечные СЭС любой мощности и назначения можно считать идеальными устройствами, которые позволяют разделить во времени процессы выработки и потребления электроэнергии, имеющими высокий КПД и вступающими в работу мгновенно.

СЭС имеют в своем составе инвертор и аккумуляторы – накопители энергии, работающие, практически, безынерционно.

В научных публикациях приводятся данные лабораторных испытаний промышленных аккумуляторов с высокими характеристиками, которые в ближайшие 2–3 года могут появиться на рынке. Такие аккумуляторы смогут накапливать и отдавать пиковую мощность более 1000 Вт на килограмм веса или 2500 Вт на литр объема, при этом их долговечность составит более 20 лет при количестве циклов «заряд – разряд» несколько тысяч, что позволяет создать для СЭС и ЭЭС высокоэффективные НЭ.

Подключение СЭС к коммунальным и централизованным сетям. К коммунальным и централизованным сетям подключаются индивидуальные жилищные системы, имеющие установленную мощность 1–10 кВт, и коммерческие системы мощностью 10–500 кВт и больше. Их подключают через двухсторонний преобразователь-инвертор, который входит в СЭС и размещен, как правило, вместе с аппаратурой управления СЭС. Подключение СЭС к сети электропередачи позволяет обеспечить обмен энергией между СЭС и ЭЭС и гарантировать круглосуточную работу СЭС независимо от времени года и метеоусловий (погоды).

Это направление в использовании солнечных энергетических систем в настоящее время переживает быстрый рост, как в результате успешного использования автономных СЭС, так и в связи с актуальностью в настоящее время решения вопросов сохранения окружающей среды и созданием *правительственных программ, направленных на демонстрацию целесообразности этих систем как альтернативы действующим энергетическим системам.*

Одновременно большие энергогенерирующие компании способствуют подключению к своим сетям СЭС, видя в этом возможность решить проблемы пиковых нагрузок, оптимизации рабочих режимов энергогенерирующего оборудования и увеличения общей установленной мощности за счет объединения СЭС и ЭЭС. Так, в США для ускорения коммерциализации фотоэлектричества 84 электростанции создали консорциум Utility Photovoltaic Grup (UPVG), который контролирует 40% энергогенерирующих мощностей США (ECD ..., 1998).

Для энергогенерирующих компаний увеличение выработки электроэнергии без увеличения потребления энергоносителей (уголь, нефть, газ, ядерное топливо) представляет значительный интерес.

Поэтому во многих странах использование грантов, займов, налоговых поощрений направлено на развитие солнечных энергетических систем как автономных, так и, особенно, сетевого использования.

При подключении СЭС к ЭЭС должны быть выполнены требования международных стандартов и рекомендаций на каналы управления, сигнализации и энергообмена.

Гибридные электроэнергетические системы (ГЭЭС).

ГЭЭС состоит из двух типов энергогенерирующих систем – СЭС и ЭЭС, которые различаются способами генерации электроэнергии. СЭС генерируют энергию постоянного тока, а ЭЭС – переменного.

Для обеспечения взаимодействия СЭС и ЭЭС в составе гибридной системы применяют быстродействующий электронный двухсторонний преобразователь-инвертор, который накопленную в НЭ энергию преобразует в энергию переменного тока и передает ее в ЭЭС, а получаемую от ЭЭС энергию переменного тока преобразует в энергию постоянного тока и направляет ее в накопитель энергии СЭС.

Для обмена энергией между СЭС и ЭЭС в произвольные моменты времени, во избежание совмещения режимов «заряд – разряд», в НЭ СЭС необходимо предусматривать применение двухсекционных накопителей энергии. Все особенности взаимодействия СЭС и ЭЭС в составе ГЭЭС должны быть учтены при модернизации каналов управления, сигнализации и каналов обмена энергией. В США выпущен стандарт на СЭС мощностью до 10 кВт, который регламентирует параметры систем, требования к инверторам и подключаемым сетям (см. IEEE Std 929-2000).

На рис. 6, а условно изображены СЭС различной установленной мощности и основные функциональные узлы, каналы управления и энергообмена.

Гибридная электроэнергетическая система (ГЭЭС)



Рис. 6. Примерный состав оборудования гибридной электроэнергетической системы

По каналам управления диспетчерская служба ГЭЭС может запрашивать и получать данные о работоспособности СЭС, о выработанной и накопленной в секциях НЭ энергии каждой СЭС. Эти данные используются для планирования расходов энергии при пиковых перегрузках и оптимизации режимов работы оборудования в соответствии с суточным графиком нагрузки энергосистемы.

На рис. 6, б условно изображены состав и функциональное назначение электрогенерирующего оборудования при реализации суточного графика нагрузки ЭЭС. ЭЭС представляет собой сложный энергогенерирующий комплекс. Особенности функционирования ЭЭС, заключающиеся в одновременном генерировании и потреблении энергии, требуют соответствия рабочей мощности всех источников энергии и мощности нагрузки в каждый момент времени. Обеспечение такого соответствия в работе при плотных графиках нагрузки и наличии необходимого числа маневренного оборудования не вызывает проблем. Однако, с 1960-х годов положение стало изменяться, так как графики нагрузки ЭЭС стали разуплотняться из-за значительного роста энергопотребления не только промышленностью, но и сельским хозяйством и коммунально-бытовым сектором. Следовательно, между источниками и потребителями электроэнергии возникло противоречие, которое необходимо устранить.

На рис. 7, а приведен суточный график нагрузки энергосистемы, на котором по горизонтали указано время суток, а по вертикали – мощность энергосистемы. На графике заштрихованные площади Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 отражают количество энергии, вырабатываемое базисными, полубазовыми, полупиковыми и пиковыми установками ЭЭС.

В суточном графике нагрузки выделяют три характерные зоны: базис, полупик и пик графика. Базисом называется часть графика, расположенная между осью абсцисс и горизонтальной линией, проведенной на уровне минимальной мощности. Полупику соответствует часть графика, расположенная между горизонтальными линиями, проведенными на уровне минимальной и средней мощности. К пику относится часть графика, расположенная выше горизонтальной линии, проведенной на уровне средней мощности.

Суточный график нагрузки энергосистемы характеризуют следующие показатели: максимальная мощность $N_{\max. \text{эс}}$; минимальная мощность $N_{\min. \text{эс}}$; средняя мощность $N_{\text{ср. эс}}$; суточная выработка электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{сут. эс}} = N_{\text{ср. эс}} \times 24$; коэффициент плотности нагрузки $\gamma = N_{\text{ср. эс}} / N_{\max. \text{эс}}$; коэффициент минимума нагрузки $\beta = N_{\min. \text{эс}} / N_{\max. \text{эс}}$. Чем равномернее потребление энергии в течение суток, тем большие значения имеют коэффициенты γ и β , тем лучше работает система и значения этих коэффициентов приближаются к 1 (Астахов и др., 1989; Гидроэлектрические станции, 1980).

По данным 1980 года, в России $\beta = 0,54$, в ФРГ – 0,42, в Англии – 0,32, в США – в пределах 0,3-0,4.

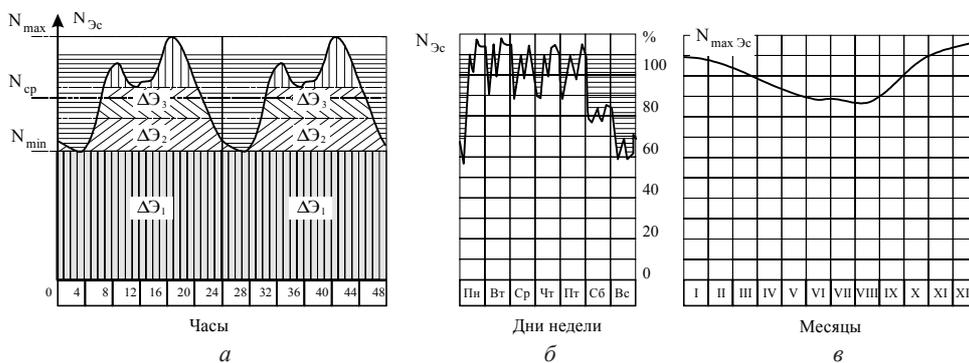


Рис. 7. Графики нагрузки энергосистемы: а – суточная, б – недельная, в – годовая

Площадь, заштрихованная горизонтальными линиями над кривой суточного и недельного графиков нагрузки энергосистемы, эквивалентна невыработанной энергии. Выработка, хранение и использование этой энергии позволило бы решить проблемы оптимизации кривой суточного графика нагрузки энергосистемы, включая компенсацию пиковых нагрузок и внезапных набросов нагрузки в энергосистеме.

На рис. 7, б приведен недельный график нагрузки энергосистемы, из которого видно, что в субботние и воскресные дни снижается выработка энергии практически в 1,5 раза по отношению к $\mathcal{E}_{\text{сут. эс}}$. Это значит, что при одном и том же расходе энергоносителей ЭЭС вырабатывает меньше энергии и эта энергия значительно дороже.

На рис. 7, в приведен годовой график нагрузки энергосистемы, который отражает сезонные изменения нагрузки, обусловленные изменением длительности светового дня и снижением (или увеличением) коммунально-бытовой нагрузки.

Технически противоречие, упомянутое выше, решается введением в состав энергосистемы накопителей энергии, с помощью которых, с одной стороны, можно обеспечить равномерную нагрузку электростанций, а с другой – выровнять переменную часть графика энергопотребления.

В современной энергетике используются различные типы накопителей: маховики (инерционные установки), конденсаторы, электрохимические и тепловые аккумуляторы, сверхпроводящие соленоиды, ГАЭС и другие установки.

Наибольшее распространение получили ГАЭС и электрохимические аккумуляторы-накопители. Сегодня в различных ЭЭС мира действуют более 300 ГАЭС с суммарной установленной мощностью более 50 ГВт. В соответствии с прогнозами к 2000 году, прежде чем попасть к потребителю, более 10 % всей выработанной энергии должно проходить через устройства накопления. В ЭЭС, которые эксплуатируются в странах СНГ, через устройства накопления проходит порядка 3% выработанной энергии.

Какие же емкости накопителей необходимо задействовать в ГЭЭС, чтобы достигнуть максимальной эффективности системы? Проведенные исследования и расчеты специалистов (Астахов и др., 1989) говорят о том, что режим эксплуатации с максимальной эффективностью может быть достигнут при мощности накопителей в системе порядка 18–20 % от суммарной установленной мощности ГЭЭС.

При выполнении указанных условий коэффициент плотности нагрузки, соответствующий оптимальному выравниванию суточного графика нагрузки энергосистемы, достигнет значения 0,87–0,88.

В ГЭЭС фрагмент системы, состоящий из СЭС, представляет собой распределенную систему и реализует функции: генерации электроэнергии, хранения электроэнергии в НЭ и обеспечения электроэнергией потребителя.

Накопители энергии СЭС работают в следующих режимах: в режиме накопления электроэнергии, получаемой от СБ, в буферном режиме с подключенными внутренними нагрузками и в режиме заряд-разряд под управлением диспетчерской службы ГЭЭС. Электроэнергия, накопленная в НЭ в течение светового дня, может быть использована, в зависимости от команд диспетчерской службы, для компенсации вечернего пика или для других целей. После прохождения вечернего пика следует режим заряда от ЭЭС в течение ночного «провала» нагрузки энергосистемы. И затем, сразу же следует утренний пик, на который расходуется электроэнергия, накопленная во время ночного «провала» нагрузки. Таким образом, накопители энергии СЭС дважды в сутки могут быть использованы для повышения эффективности работы ГЭЭС. При этом из накопителей отбирается такое количество электроэнергии, которое необходимо для компенсации пиков и неожиданных «набросов» нагрузки в энергосистеме и, одновременно, обеспечивается работоспособность, независимо от погодных условий и сезона, фрагмента СЭС. Из рассмотрения режимов работы и их цикличности следует, что в ГЭЭС СЭС и ЭЭС органично дополняют друг друга и повышают эффективность энергосистемы в целом.

При работе в составе ГЭЭС аппаратура управления, инверторы и накопители энергии СЭС выполняют функции общесистемных устройств. Кроме того, следует учитывать, что при поступлении электроэнергии в НЭ СЭС во время ночного «провала» НЭ функционирует как управляемая активная нагрузка для генерирующих электростанций.

Накопленная в НЭ электроэнергия может быть оперативно использована в разных ситуациях, возникающих при эксплуатации ГЭЭС.

Из приведенного выше описания взаимодействия фрагментов СЭС и ЭЭС наглядно видно, что необходимое количество электроэнергии, которое вырабатывается СЭС, может быть использовано для компенсации пиков и выравнивания суточного графика нагрузки ЭЭС, а электроэнергия, вырабатываемая ЭЭС во время ночного «провала» нагрузки, может быть использована для устойчивой, круглосуточной работы входящих в гибридную систему СЭС.

Эффективность и количество вырабатываемой электроэнергии СЭС зависит от региона расположения, от конструкции СБ (с системой автоматического слежения за солнцем или с фиксированной ориентацией), от сезона и освещенности (см. рис. 8, 9). Среднегодовая выработка электроэнергии приведена на рис. 10. Максимальная эффективность СЭС может быть достигнута при создании межрегиональных (межгосударственных) энергосистем – энергетических магистралей. Такие системы могут иметь большую протяженность в широтном направлении и обеспечивать круглосуточное поступление электроэнергии в энергосистему.

Для систем, расположенных на больших территориях, можно повысить эффективность и оптимизировать режимы управления энергосистемой за счет использования метеопрогнозов и информации с метеоспутников.

Состав оборудования и технические характеристики ГЭЭС. Технические характеристики и состав оборудования фрагмента ЭЭС (см. рис. 6, б) известны, т.к. система действующая, а состав оборудования и технические характеристики фрагмента СЭС зависят от ЭЭС.

Для оценки технических характеристик гибридной энергосистемы (рис. 7, а) примем N_{\max} равным 1000 МВт и длительность ночного «провала» нагрузки 8 часов.

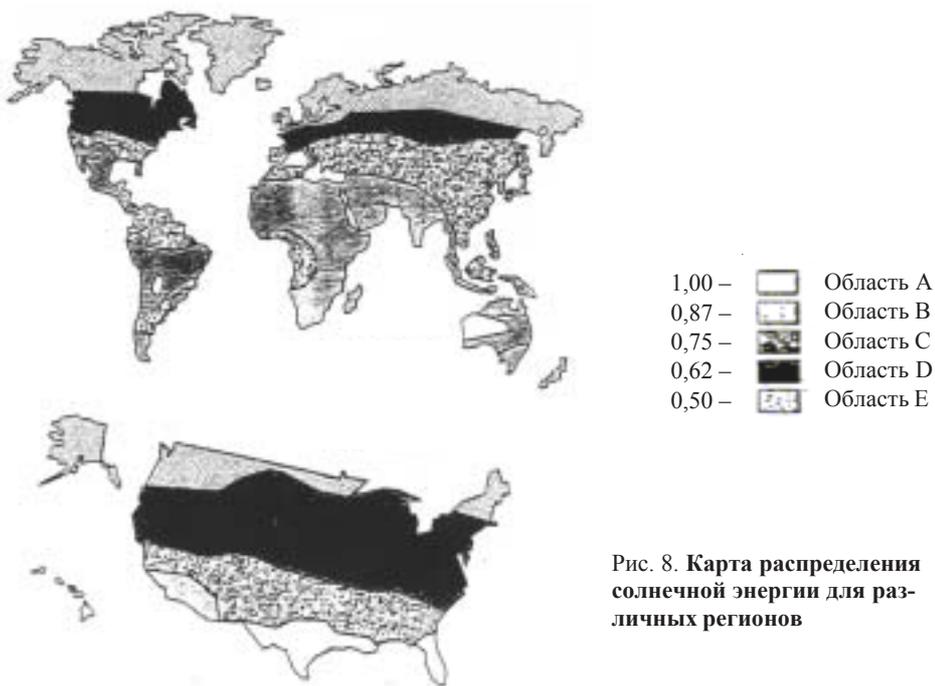


Рис. 8. Карта распределения солнечной энергии для различных регионов

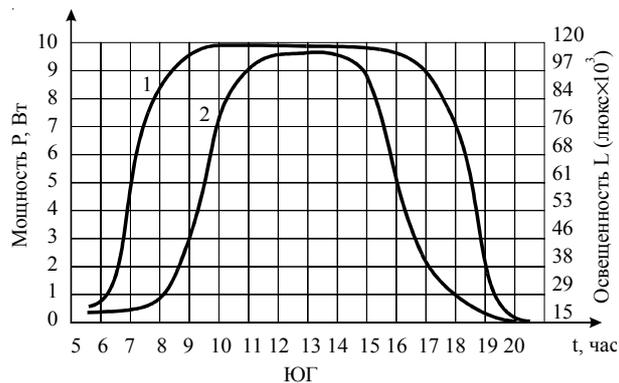


Рис. 9. Зависимость выходной мощности солнечного модуля от азимута и угла места в течение светового дня с 5-00 до 20-00: 1 – суммарная энергия за световой день при ориентации плоскости солнечного модуля по нормали к солнцу; 2 – суммарная энергия за световой день при ориентации плоскости солнечного модуля по азимуту на юг и углу места 60°

Анализируя кривую суточного графика нагрузки, отметим, что во время ночного «провала» нагрузки генерирующие мощности снижаются до 600 МВт, а потери мощности составляют порядка 300 МВт. Таким образом, электроэнергию ночного «провала» можно оценить в 2400 МВт×ч (300 МВт×8 ч). Эту электроэнергию необходимо сохранить и использовать для компенсации пиков и выравнивания суточного графика нагрузки энергосистемы, энергообмена с фрагментом СЭС. Сохранить реально такое количество электроэнергии можно только в накопителях энергии СЭС. Определим какое количество накопителей энергии СЭС должно быть задействовано в гибридной энергосистеме.

В практике эксплуатации СЭС используются такие варианты: накопители энергии, обеспечивающие хранение электроэнергии, вырабатываемой СБ за 5-6 часов, накопитель, обеспечивающий хранение электроэнергии, вырабатываемой СБ за полный световой день и накопитель, емкость которого задается потребителем.

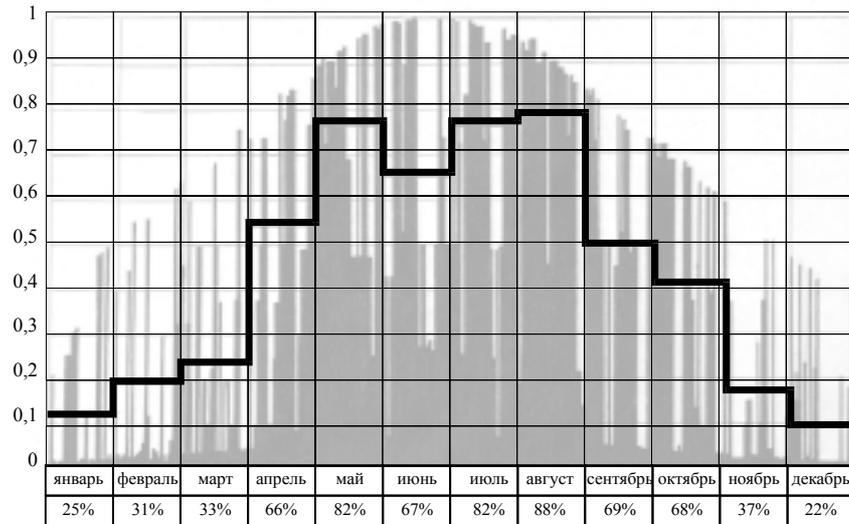


Рис. 10. График выработки энергии при автоматическом слежении за Солнцем

Предположим, что в ГЭЭС будут использоваться СЭС установленной мощности 1–10 кВт, на которые в ряде стран действуют стандарты. Выберем для оценки СЭС с установленной мощностью 2, 5 и 10 кВт и определим емкость накопителя энергии СЭС, которая соответственно будет иметь значение 16, 32 и 64 кВт×ч. Теперь определим, какое количество СЭС может быть подключено к ГЭЭС и на сколько увеличится установленная мощность создаваемой энергосистемы. Результаты оценок сведем в табл. 4.

Таблица 4

Оценка параметров для исходной ЭЭС установленной мощности 1000 МВт

Установленная мощность СЭС, кВт	Емкость НЭ СЭС, кВт×ч	Количество подключаемых СЭС, шт.	Суммарная установленная мощность подключаемых СЭС, МВт
2	16	150 000	300
5	32	75 000	375
10	64	37 500	375

Достоинства, приобретаемые энергосистемой при создании ГЭЭС. За счет дополнительной энергии, получаемой с фрагмента СЭС, и эффективного использования накопителя энергии СЭС повышается эффективность действующего энергогенерирующего оборудования. Коэффициент плотности нагрузки γ и коэффициент минимума нагрузки β стремятся к единице.

Увеличение установленной мощности энергосистемы не требует увеличения расхода энергоносителей (угля, нефти, газа и ядерного топлива) и, следовательно, не производится их закупка.

Например, расход газа для ТЭС мощностью 1000 МВт составляет 1,8–2,0 млрд. м³ в год при цене 50 дол. США за 1000 м³ и требует затрат в 100 млн. дол. США в год.

Вновь вводимые мощности энергосистемы не производят вредных выбросов в атмосферу, не требуют расхода воды при эксплуатации и не загрязняют реки и водоемы.

При создании ГЭЭС не требуется капитального строительства, создания инфраструктуры, увеличения обслуживающего высококвалифицированного персонала, так как необходимое обслуживание осуществляет непосредственно владелец СЭС.

Для транспортировки электроэнергии не требуется строительства новых ЛЭП.

Повышается безаварийность работы энергосистемы, т.к. значительные количества электроэнергии генерируются и хранятся в накопителях энергии СЭС непосредственно у потребителя.

Электроэнергия, накопленная и хранящаяся в накопителе энергии СЭС, может быть оперативно использована вместо энергии от энергоустановок «горячего» резерва.

При увеличении количества подключаемых СЭС растет выработка и запасы электроэнергии, что позволяет пересмотреть состав оборудования, работающего в зоне пика и полупика, а также может быть пересмотрена необходимость строительства ГАЭС.

Из табл. 4 видно, что подключаемые мощности СЭС достаточны для компенсации пиков и выравнивания суточного графика нагрузки энергосистемы.

За счет создания ГЭЭС практически можно увеличить установленную мощность энергогенерирующего оборудования в два раза и более.

Заключение

Разработки ФЭП, ФЭМ и СЭС достигли высокого уровня и наступило время создания крупных производств по их промышленному изготовлению. При освоении крупномасштабного производства солнечная энергетика станет конкурентоспособной на экономической основе с традиционными способами генерации электроэнергии за счет сжигания угля, нефти газа и ядерного топлива. Солнечная энергетика находится вне конкуренции, в сравнении с другими, как безопасный и экологически чистый способ генерации электроэнергии.

Вопросы создания ГЭЭС рассмотрены концептуально с целью демонстрации возможности создания таких энергосистем. Настало время развернуть исследования и практические разработки таких систем.

В Украине имеются необходимые природные ресурсы, перерабатывающие и машиностроительные предприятия для создания современного производства СЭС различного назначения.

Специалисты и эксперты предсказывают, что к 2020 году из всей производимой в мире электроэнергии более 15% будет составлять солнечная, то есть более 750 ГВт энергогенерирующих мощностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1989. – 158 с.
- Гидроэлектрические станции / Под ред. Ф.Ф. Губина, Т.И. Кравченко. Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия. – 1980.
- Коротеев А.С., Кошеляев Е.М., Решмин А.И. // Изв. АН Украины. Энергетика. – 2001. – № 5.
- Рамад Франсуа. Основы прикладной экологии. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 543 с.
- Розанов Б.Г. Основы учения об окружающей среде: Учеб. пособ. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 370 с.
- ECD. 100 MW Manufacturing Plant, October 1998.
- Elektronechn und Informationstechn. – 1999. – 116, № 9.
- Langest Solar Roof in the World. – Eur.Power News. – 2001. – 26, № 4.
- Photovoltaic Insider's Rept. – 1998. – 17, № 12.
- Photovoltaic Insider's Rept. – 1999. – 18, № 1.
- Photovoltaic Insider's Rept. – 1999. – 18, № 9.
- Renewable Energy World. – 2001. – 4, № 2.
- Renewable Energy World. – 2001. – 4, № 3.
- Sonnenerg und Wärmetechn. – 2000. – № 2.
- Storwarz. elek. pol. – 1999. – 67, № 1.

Надійшла до редколегії 04.09.02