

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Прогнозирование надежности солнечных электростанций на стадии их проектирования

Воронков Э. Н., доктор физ.-мат. наук, Грозных В. А., канд. техн. наук, Зезин Д. А., инж.

НИУ “МЭИ”, Москва

Выполнена оценка длительности жизненного цикла солнечной электростанции при эксплуатации без смены первоначально установленных элементов. Предложенная методика позволяет оценить изменение интенсивности отказов при использовании солнечных панелей различной степени надежности, что особенно перспективно на начальном этапе проектирования.

Ключевые слова: солнечная энергетика, солнечные электростанции, срок службы солнечных электростанций, надежность.

Под солнечной электростанцией (СЭС) обычно подразумевается объект, генерирующий электроэнергию в результате преобразования солнечного излучения. Предполагается, что основное назначение СЭС заключается в частичном или полном снятии нагрузки в период ее функционирования с электростанций, использующих традиционные виды топлива.

Постепенное повышение стоимости электроэнергии и быстрое снижение стоимости фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии стимулировали исследования в области разработки солнечных электростанций. В настоящее время ежегодный прирост мощности эксплуатируемых фотоэлектрических установок в мире составляет примерно 40 %, и их суммарная мощность достигла 100 ГВт (по данным *European Photovoltaic Industry Association*). Строительство СЭС началось примерно с 2005 г., и сейчас их доля является основной в общем приросте преобразующих солнечную энергию мощностей. При этом по мере накопления опыта проектирования, строительства и эксплуатации СЭС наблюдается тенденция к увеличению их мощности. Так, в США в 2015 г. должны быть введены в строй две электростанции мощностью по 500 МВт (*Dissert Sun Light u Topaz Solar Farm*), в КНР объявлено о планах строительства СЭС мощностью 1 ГВт. В России (в Новочебоксарске) построен завод, ежегодная производительность которого должна составить 130 МВт установленной мощности — это более 1 млн солнечных панелей (СП).

Основная особенность СЭС заключается в том, что генерирующий электроэнергию сол-

нечный элемент (СЭ) — маломощный. При максимальной освещенности он способен отдавать в нагрузку мощность от одного до нескольких ватт при напряжении, как правило, не превышающем 2 В и токе от одного до нескольких ампер. Солнечный элемент устанавливают на солнечной панели. Одна СП может содержать до 100 СЭ. В зависимости от мощности для СЭС необходимо от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов СП. Объединение такого большого количества объектов в единую сеть осуществляется по иерархической структуре с однотипными блоками разного уровня.

На первоначальном этапе (до момента реконструкции) СЭС состоит из одинаковых СП, поэтому общая мощность СЭС

$$M_{СЭС} = \sum_{i=1}^N M_{с.п} - \sum_{i=1}^n M_{и} \approx \sum_{i=1}^N M_{с.п}, \quad (1)$$

где $M_{с.п}$ — пиковая мощность СП; N — число панелей; $M_{и}$ — мощность интерфейсных блоков, включающих инверторы, контроллеры и другое электронное оборудование; n — число интерфейсных блоков.

В выражении (1) СП рассматривается как начальный генерирующий элемент СЭС, отказ которого приводит к соответствующей потере мощности всей СЭС. Под отказом СП понимается выход эксплуатационных параметров панели за пределы, установленные при проектировании СЭС. Самые ненадежные элементы СЭС — интерфейсные блоки, включающие в себя инверторы и другие электронные блоки. Исключить их из рас-

смотрения возможно, если предположить, что каждый не генерирующий электричество элемент имеет схему резервирования, которая обеспечивает ему работоспособность на протяжении всего жизненного цикла СЭС.

Структура параллельных соединений блоков СЭС практически исключает каскадные отключения. Это позволяет при ее анализе допустить, что все отказы носят случайный характер [1, 2] и отказ одного структурного элемента не приводит к отказу каких-либо других элементов системы, однако выходная мощность СЭС уменьшается пропорционально числу отказавших СП. Условия эксплуатации должны быть отражены в техническом паспорте панели и учтены в гарантийном сроке работы.

При указанных допущениях изменение мощности СЭС во времени можно описать формулой

$$M_{\text{СЭС}}(t) = M_0 \left[1 - \int_0^t f(t) dt \right], \quad (2)$$

где M_0 — пиковая мощность электростанции в момент запуска, которая зависит от числа установленных панелей; $f(t)$ — распределение плотности вероятности отказов панелей [1–3].

По существу, СЭС является гигантской электронной схемой, а ее основной элемент СП — это интегральная схема, состоящая из полупроводниковых СЭ. При оценке вероятности отказов $p(t)$ полупроводниковых приборов в качестве функции $f(t)$ чаще всего используется экспоненциальное распределение [4, 5]. Особенность этого распределения состоит в том, что для него интенсивность отказов остается постоянной на любом интервале времени. Однако у СЭ и СП интенсивность отказов изменяется во времени. Объясняется это тем, что при производстве СЭ происходит их искусственное старение из-за выдержки при повышенных температурах и освещенностях, что позволяет отбраковать наиболее ненадежные устройства. Поэтому кривую вероятности отказов $p(t)$ точнее описывает распределение Вейбулла [5]

$$p(t) = 1 - e^{-(t/a)^b}, \quad (3)$$

где a — параметр, характеризующий время жизненного цикла; b — параметр, характеризующий изменение распределения во времени.

Выпускаемые и разрабатываемые в настоящее время солнечные модули условно можно разделить на группы в соответствии с их гарантийным сроком, декларируемым производителями (I, II, III и т. д.). При этом к I группе относятся панели со сроком службы не менее 10 лет, ко II — не менее 20 лет, к III — 30 лет и т. д. Каждая группа должна иметь подгруппы, различающиеся распределением интенсивности отказов во времени. Чем совершеннее конструкция и технология, тем меньше факторов, влияющих на деградацию СЭ, и тем компактнее во времени область интенсивных отказов. На этапе проектирования допустимо ограничиться использованием двух подгрупп: основной, в которой надежность определяется преимущественно технологией, и дополнительной “а”, где деградация СЭ определяется непосредственно физическими процессами, связанными с преобразованием солнечного излучения. Для основной группы целесообразно в формуле (3) задать $b = 2a$, в подгруппе “а” — $b = 6$ [6]. Масштабный коэффициент a задается в соответствии с гарантийным сроком производителя.

В настоящее время все разрабатываемые и выпускаемые СЭ (соответственно и панели) можно разделить на три поколения [7]. Первое поколение СЭ выполнено на основе монокристаллических и мультикристаллических пластин, второе — на основе тонких пленок поликристаллических и аморфных полупроводников, третье — на основе новых физических принципов и технологий, таких, как использование наночастиц, сверхрешеток, “очувствление” красителями и др. [7]. Работы в области СЭ третьего поколения обещают создание эффективных СЭ, которые в перспективе должны значительно увеличить КПД преобразования солнечного излучения и повысить производительность технологического процесса.

На рис. 1 показано построенное на основе данных *National Renewable Laboratory USA* изменение по годам рекордных значений КПД СЭ, созданных по разным технологиям [8]. Приведенные на рисунке результаты могут помочь при разбиении панелей с различными типами СЭ на группы надежности.

Надежных данных о времени жизненного цикла СП в земных условиях для разных технологий и производителей сегодня нет. Объясняется это тем, что строительство СЭС началось сравнительно недавно, и результаты

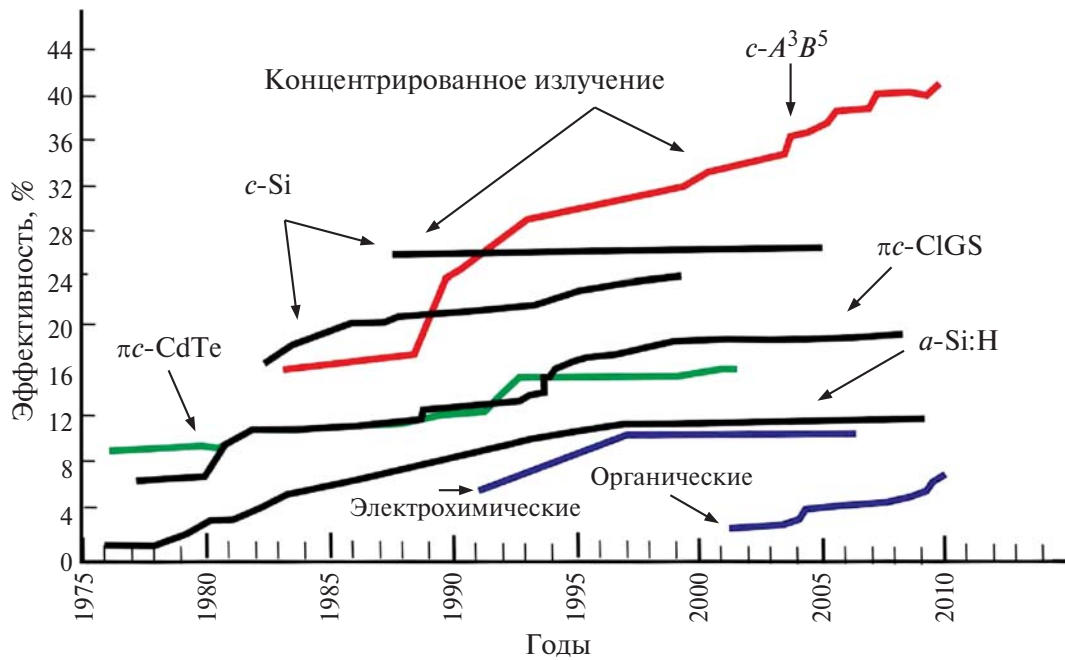


Рис. 1

Группа	Тип СЭ	η_T , %	η_3 , %	η_{II}	k_3	$k_{II,T}$
I	Трехкаскадные тонкопленочные СЭ на основе a -Si:H	52	12	9	0,23	0,83
	Тандемный СЭ на основе a -Si:H и μ -Si:H	45	12	10	0,27	0,83
	NG*	60	10	—	0,17	—
II	c -Si СЭ	28	22	18	0,78	0,82
	mc -Si СЭ	28	20	15	0,71	0,75
	Тандемные СЭ на основе a -Si:H и μ -Si:H	45	12	10	0,23	0,88
	Тонкопленочные pc -CIGS СЭ	32	20	14	0,66	0,73
	Тонкопленочные pc -CdTe СЭ	34	19	12	0,63	0,70
	Трехкаскадные СЭ на основе соединений A^3B^5 (концентрированное излучение)	60	42	—	0,70	—
III	c -Si СЭ	28	22	22	0,86	0,91
	c -GaAs СЭ	32	25	22	0,78	0,88
	Тонкопленочные pc -CdTe СЭ	34	19	14	0,20	0,74
IV	c -Si СЭ	28	24	—	0,85	—

* NG (от англ. New Generation) — третье поколение солнечных элементов и панелей.

анализа мониторинга с эксплуатируемых объектов поступают прежде всего производителям панелей для устранения выявленных дефектов. Тем не менее можно сделать некоторое предварительное разбиение СЭ и СП по группам на основе имеющихся в литературе публика-

ций, а также учета типа панелей, используемых для долгосрочных проектов. В таблице показано условное разбиение по группам СЭ, представленных на рис. 1, и изготавливаемых на их основе панелей. Для каждого типа СЭ указаны его теоретический η_T и максимально

достигнутый при заданной технологии η_3 КПД, а также соответствующий КПД для панели $\eta_{п.т}$. Совершенство конструкции и использованной технологии СЭ характеризует обобщенный коэффициент $k_3 = \eta_3/\eta_{п.т}$. Он отражает перспективы повышения надежности СЭ и панелей на их основе, поскольку приближение КПД к теоретическому пределу сопровождается уменьшением как общей, так и диссипационной энтропии, возникающей в процессе преобразования энергии [7, 9]. КПД и надежность у СП ниже, чем у СЭ. В идеальном случае эффективность преобразования СП должна совпадать с эффективностью преобразования СЭ. Однако технология СП, состоящей из множества СЭ, сложнее, чем технология отдельного СЭ. Характеристики конструктивного и технологического совершенства панели характеризуются коэффициентом $k_{п.т} = \eta_{п.т}/\eta_3$.

В таблицу включены СЭ третьего поколения (органические на рис. 1), которые пока обладают низкой эффективностью. Панели на основе СЭ третьего поколения в промышленных масштабах не выпускаются.

Следует отметить, что совершенствование технологии приводит не только к повышению КПД, но и к снижению степени деградации. Именно степень сближения реального и теоретического КПД может служить одним из критериев, по которому прогнозируется надежность СЭ и СП.

Если соотнести основные поколения СЭ с рассмотренной классификацией, то в III группу надежности следует включить СЭ, изготавливаемые на основе пластин монокристаллического кремния (*c*-Si). Как видно из рис. 1, КПД этих СЭ почти достиг предела и не изменяется в течение ряда лет. Мониторинг находящихся в эксплуатации панелей показывает, что, по-видимому, срок их службы принципиально может уже сейчас быть увеличен по крайней мере до 50 лет [10]. Мультикристаллические кремниевые СЭ (*mc*-Si) со средним КПД около 15 % близки по своим свойствам к монокристаллическим [8]. Однако СЭ этого типа уступают монокристаллическим элементам не только по эффективности, но и по надежности, что объясняется наличием межкристаллитных границ. Именно эти границы являются одним из потенциальных источников деградации СЭ.

К III группе также можно отнести кристаллические СЭ на основе GaAs (*c*-GaAs), которые сравнительно давно применяются

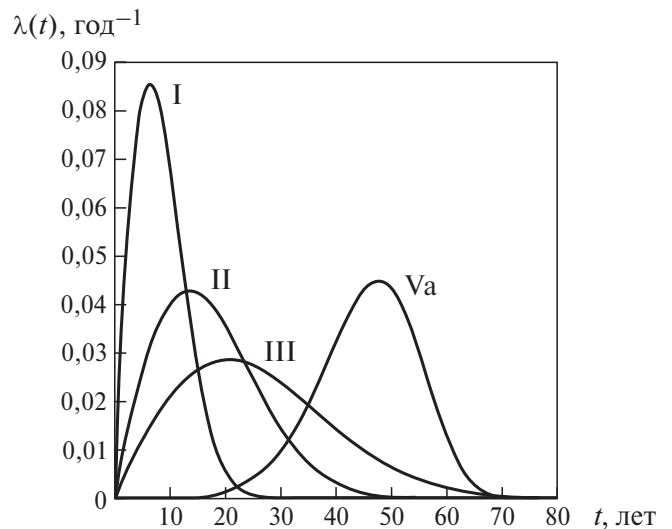


Рис. 2

в космической энергетике и имеют многолетнюю отработанную технологию. Однако приборы этого типа весьма дорогие и в наземной энергетике не используются. Более перспективными для наземного применения следует считать многокаскадные кристаллические СЭ на основе соединений A^3B^5 ($c-A^3B^5$), которые успешно используются с концентраторами света. Основной причиной деградации этих приборов могут быть процессы, происходящие на границах между слоями с разной шириной запрещенной зоны, не согласованными по параметрам кристаллических решеток.

Лучшие поликристаллические (*пс*) тонкопленочные СЭ второго поколения, изготовленные на основе $Cu_xIn_yGa_zSe$ (CIGS) и CdTe, имеют КПД примерно 20 %, при этом для интегральной панели CdTe получено значение КПД 14 %, именно поэтому эти СЭ были отнесены ко II группе, несмотря на недостаток статистических данных. Постепенное совершенствование технологии СЭ этих двух типов сопровождалось увеличением гарантийного срока их службы и повышением КПД (см. рис. 1). Среди СЭ второго поколения они — первые кандидаты для перехода в III группу.

Важной характеристикой статистического распределения является изменение интенсивности возможных отказов во времени: $\lambda(t) = dp(t)/p(t)dt$. На рис. 2 приведены зависимости интенсивности отказов от времени, построенные для групп I–III и подгруппы Va. Как видно, для всех основных групп надежности СЭ и СП распределение

отказов во времени довольно широкое, и установленные на СЭС панели начинают выходить из строя фактически с момента начала эксплуатации. Это особенно заметно на больших СЭС.

В настоящее время среди производимых СП самой надежной является группа III. Но на СЭС, рассчитанных на эксплуатацию в течение 50 лет, даже самые надежные СП группы III, установленные при пуске СЭС, должны полностью смениться.

Опыт показывает, что после запуска в массовое производство СЭ и СП новых типов, несмотря на высокие параметры отдельных рекордных образцов, надежность изделий повышается сравнительно медленно. Примером могут служить СЭ и СП, изготовленные по массовой технологии, для которых потребовалось более 50 лет, чтобы они перешли из группы I в группу III (см. рис. 2). Этому переходу соответствовало увеличение КПД СЭ с 7% [11] до 24% (см. рис. 1). Следует отметить, что СП, собранная из специально отобранных СЭ *c*-Si 50 лет назад, работает до сих пор, что свидетельствует о ее принадлежности к группе II (см. рис. 2). Сейчас наличие отдельных рекордсменов СП на основе *c*-Si свидетельствует о реальности по мере совершенствования технологии перехода СП этого типа в группу V (кривая Va на рис. 2) [10].

Таким образом, на основе модели, описывающей выход солнечных панелей из строя, возможно прогнозирование времени вероятного жизненного цикла солнечной электростанции заданного типа, эксплуатируемой без ремонта и замены первоначально установленных элементов. Все выпускаемые и разрабатываемые в настоящее время СЭ и панели по прогнозируемой надежности разделены на группы в соответствии с их гарантийным сроком. Основанием для включения отдельных СЭ и СП в различные группы послужи-

ли как известные литературные данные, так и некоторые обобщенные критерии априорной оценки их качества. Предложенная методика позволяет уже на стадии проектирования оценить интенсивность отказов и соответственно заложить в исходный проект ресурсы, необходимые для замены панелей.

Список литературы

1. **Нозик А. А., Можаяев А. С.** Расчет надежности, безопасности и риска при проектировании и эксплуатации технических систем. — Теплоэнергоэффективные технологии, 2007, № 3/4 (48/49).
2. **Хенли Э. Дж., Кумамото Х.** Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1984.
3. **Райншке К.** Модели надежности и чувствительности систем. — М.: Мир, 1979.
4. **Воронков Э. Н.** Надежность полупроводниковых приборов и микросхем. — М.: МЭИ, 1986.
5. **Зенова Е. В.** Основы теории и расчета надежности изделий электронной техники. — М.: Изд-во МЭИ, 2005.
6. **Laronde R., Charki A., Bigaud D.** Lifetime estimation of a photovoltaic module based on temperature measurement. — Proceedings of 2nd IMEKO TC 11 International Symposium Metrological infrastructure, environmental and energy measurements IMEKO-MI2011, June 15–17, Cavtat, Dubrovnik Riviera, Croatia.
7. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.** Edited by Antonio Luque. — John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2003.
8. **Solar cell efficiency tables /** Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop. — Prog. Photovolt: Res. Appl., 2012, № 20.
9. **Пригожин И.** От существующего к возникающему. — М.: КомКнига, 2006.
10. **Dunlop E. D.** Lifetime performance of Crystalline Silicon PV Modules. — Proc. 3rd World Conferencen Photovoltaic Energy. Vol. C, Osaka, Japan, May, vol. 3.
11. **Berk W. I.** Werner Luft. Photovoltaic Solar Arrays for Communication Satellites. — Proceedings of the IEEE, 1971, vol. 59, № 2.

voronkoven@mpei.ru