

# Деградация кремниевых тонкопленочных микроморфных ( $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si) солнечных модулей: оценка сезонной эффективности на основе данных мониторинга

© Д.А. Богданов<sup>1,2,3</sup>, Г.А. Горбатовский<sup>2</sup>, В.Н. Вербицкий<sup>2</sup>, А.В. Бобыль<sup>2</sup>, Е.И. Теруков<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Lappeenranta University of Technology,  
53850 Lappeenranta, Finland

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ООО „НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе“,  
194064 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dmitrii.bogdanov@lut.fi

(Получена 15 декабря 2016 г. Принята к печати 9 февраля 2017 г.)

Разработан метод оценки эффективности работы  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si солнечных модулей на основе анализа данных мониторинга значения тока и напряжения в точке максимальной мощности и данных измерения температуры поверхности модуля. Приведена методика оценки параметров работы  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si модулей в ходе эксплуатации после начальной деградации модуля, и произведено сравнение результатов оценки параметров со значениями, измеренными в лаборатории. Ошибка оценки параметров не превысила 3%, для максимальной мощности модуля в стандартных условиях ошибка оценки составила 0.36%. Данная методика может применяться для оценки эффективности модуля и краткосрочного прогнозирования (день, неделя) мощности генерируемой солнечной энергоустановкой в условиях эксплуатации с использованием стандартных средств мониторинга.

DOI: 10.21883/FTP.2017.09.44887.8018

## 1. Введение

Одним из недостатков фотоэлектрических преобразователей на основе аморфного и микрокристаллического кремния ( $\alpha$ -Si и  $\mu$ c-Si) является эффект светоиндуцированной деградации (эффект Стаблера–Вронского) [1], приводящей к снижению эффективности работы модулей на величину 10–15% [2] (при нормальных условиях) и менее 10% и более 15% при высоких и низких средних температурах эксплуатации соответственно (величина снижения эффективности тандемных  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si модулей, установленных осенью 2011 г. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, за период с мая 2013 г. по декабрь 2015 г. составила 18–20% с учетом начальной деградации).

Это связано с тем, что одновременно с процессом фотоиндуцированной деградации идет термически активируемый процесс отжига оборванных связей в материале, приводящий к восстановлению эффективности работы преобразователей. Скорость и величина деградации зависят от мощности потока солнечного излучения, падающего на поверхность панели, и рабочей температуры панели. Таким образом, колебания мощности излучения и температуры оказывают влияние на величину деградации и могут приводить как к снижению, так и к росту эффективности работы преобразователей и стабилизация характеристик будет происходить на различных уровнях [3]. Такое нелинейное изменение характеристик преобразователей затрудняет моделирование работы энергоустановок, что усложняет расчет

окупаемости проекта и снижает общую надежность энергосистемы.

Для эксплуатации крупных фотоэлектрических энергоустановок, построенных на основе  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si тонкопленочных модулей, критически важным является создание систем мониторинга величины деградации. Применение таких систем позволит повысить надежность работы и обслуживания существующих солнечных энергоустановок, рассчитывать сроки окупаемости новых проектов. В данный момент для оценки эффективности тонкопленочных модулей с учетом их деградации в процессе эксплуатации необходимо проводить периодические контрольные измерения на специализированном оборудовании или проводить измерения прямой и диффузной составляющей солнечного излучения для оценки мощности солнечного излучения на поверхности модуля. Разработаны методы оценки будущих значений эффективности  $\alpha$ -S/ $\mu$ c-Si тонкопленочных модулей на основе экстраполяции предыдущих измерений эффективности [4] и моделирования процессов светоиндуцированной деградации и отжига оборванных связей, на основе данных мониторинга температуры поверхности модулей и мощности солнечного излучения [5]. Однако данные методы требуют установки дополнительного дорогостоящего оборудования: систем измерения эффективности модулей в стандартных условиях, пиранометров для измерения мощности солнечного излучения. Достоинством прямого измерения характеристик модуля в стандартных условиях является его точность, однако данные измерения могут приводить к ускорению де-

градации характеристик модулей в связи с повышенными механическими нагрузками [6]. Недостатком метода оценки эффективности, основанного на моделировании деградации и отжига оборванных связей, является его сложность и невысокая точность.

В то же время измерение значений тока и напряжения модуля в точке максимальной мощности в процессе эксплуатации энергоустановки возможно при помощи контроллера заряда и обычного измерительного оборудования. Совокупность значений тока и напряжения максимальной мощности при различных значениях солнечного излучения при наличии модели полностью описывает характеристики работы модуля.

## 2. Обработка данных мониторинга

Для исключения влияния на вольт-амперные характеристики (ВАХ) модуля сезонных изменений температуры данные мониторинга мощности и тока модуля в точке максимальной мощности следует привести к стандартной температуре (STC) — 25°C, для чего можно воспользоваться следующими формулами температурной коррекции [7]:

$$\tilde{P} = P(T_c)[1 - \alpha_P(T_c - T_{STC})], \quad (1)$$

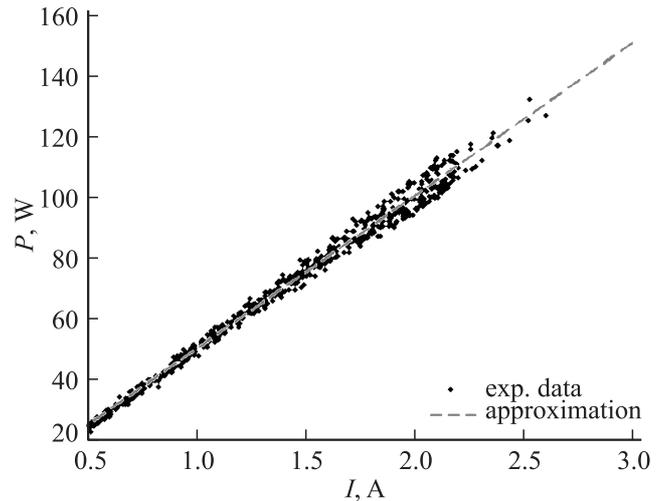
$$\tilde{I} = I(T_c)[1 - \alpha_I(T_c - T_{STC})], \quad (2)$$

где  $\tilde{P}$ ,  $\tilde{I}$  — мощность и ток в точке максимальной мощности, приведенные к стандартной температуре  $T_{STC}$ ,  $P(T_c)$  и  $I(T_c)$  — измеренные мощность и ток в точке максимальной мощности;  $\alpha_P$  и  $\alpha_I$  — температурные коэффициенты для мощности и тока соответственно,  $T_c$  — температура поверхности модуля. На рис. 1 представлены данные мониторинга мощности и тока максимальной мощности кремниевого тонкопленочного модуля (КТМ), измеренные в мае 2013 г.

Из рис. 1 видно, что множество точек измерений для одного месяца расположены вдоль прямой линии. Для дальнейшего анализа проведем аппроксимацию экспериментальных данных прямой вида  $y(x) = p_1x + p_2$  и будем наблюдать за изменением параметра  $p_1$ , отражающего наклон прямой, от месяца к месяцу. Отклонения данных измерения от прямой объясняются погрешностью измерений, а также неточностью корректировки влияния температурного коэффициента в связи с тем, что температура модуля не измерялась напрямую, а оценивалась на основе данных мощности солнечного излучения по формуле [8]

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{NOCT}}(T_{NOCT} - T_{a,NOCT}), \quad (3)$$

где  $T_a$  — температура окружающего воздуха,  $G$  — мощность солнечного излучения на поверхности модуля,  $T_{NOCT}$  — температура модуля при мощности излучения  $G_{NOCT} = 800 \text{ Вт/м}^2$  и температуре воздуха  $T_{a,NOCT} = 20^\circ\text{C}$ .



**Рис. 1.** Зависимость мощности генерируемой  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si КТМ модулем от тока для мая 2013 г. Точками обозначены данные мониторинга, а красной пунктирной линией — результат линейной аппроксимации.

Применение линейной аппроксимации для анализа данных мониторинга требует обоснования. В общем случае зависимость мощности от тока в точке максимальной мощности является нелинейной. Покажем это, рассматривая простейшую однодиодную модель, в которой ВАХ описывается уравнением

$$I(V) = I_{ph} - I_0 \left| \exp\left(\frac{V}{V_t}\right) - 1 \right|, \quad V_t = \frac{kT}{q}. \quad (4)$$

Мощность в точке максимальной мощности:

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp}. \quad (5)$$

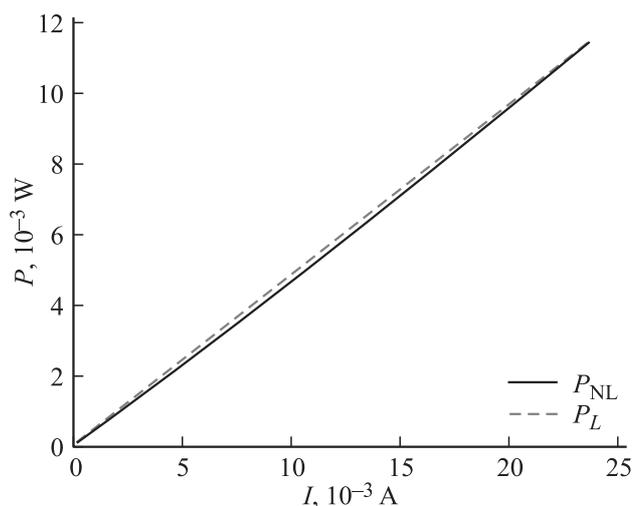
Выразим  $V_{mp}$  через  $I_{mp}$ , индекс mp далее будет опущен:

$$V(I) = V_t \ln \left| \frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right|. \quad (6)$$

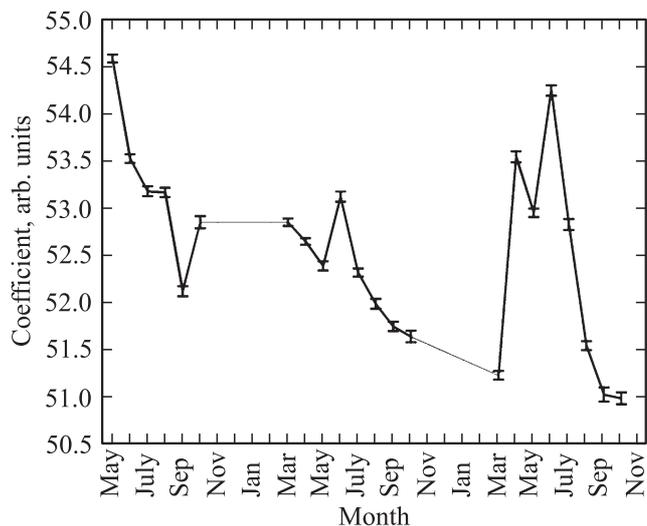
Тогда мощность будет определяться как

$$P(I) = I \cdot V_t \ln \left| \frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right|. \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), зависимость  $P(I)$  содержит нелинейный множитель в виде логарифма, однако его влияние на вид характеристики является незначительным. Рассмотрим численный пример. Пусть ток насыщения  $I_0$  равен  $10^{-12}$  А, а зависимость фототока от интенсивности излучения является линейной  $I_{ph} = \alpha G$ ,  $\alpha = 2.5 \cdot 10^5$ . В таком случае зависимость мощности от тока сублинейна и среднеквадратичное отклонение от линейной зависимости составит 62.8753 мкВт. На рис. 2 представлена зависимость  $P(I)$  для линейного (индекс L) и нелинейного (индекс NL) случаев. Эффекты деградации приводят к образованию дополнительного рекомбинационного тока, что отражается на



**Рис. 2.** Зависимость мощности от тока в точке максимальной мощности для рассматриваемого численного примера.



**Рис. 3.** Изменение коэффициента наклона прямой точек МРРТ  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si KTM модуля в процессе эксплуатации за период май 2013–ноябрь 2015. Разрывы обусловлены отсутствием достоверных данных для данных месяцев.

зависимости  $P(I)$  в виде изменения угла наклона всей характеристики. Поэтому интерес представляет именно наклон зависимости  $P(I)$ , для чего удобнее пользоваться линейной аппроксимацией, даже несмотря на слабо нелинейный характер.

На рис. 3 представлены значения и доверительный интервал (нормальное распределение, вероятность 0.95) коэффициентов наклона  $p_1$  аппроксимирующих прямых для каждого месяца в период с мая 2013 г. по май 2014 г. Из графика видно, что наклон прямых уменьшается в течение года и соответствует ожидаемому процессу деградации модулей: быстрее всего модуль деградировал в течение мая, в летние месяцы процесс замедляется, что может быть связано с высокой температурой моду-

лей и отжигом оборванных связей, стабилизируется в августе и продолжается осенью в связи с понижением температуры эксплуатации. Зимние месяцы не являются репрезентативными из-за эксплуатации модулей при токах менее 0.5 А.

### 3. Модель вольт-амперной характеристики и оптимизация ее параметров

Для описания ВАХ фотоэлемента была применена модифицированная однодиодная модель (рис. 4), позволяющая учитывать процессы фотоиндуцированной деградации, происходящие в модуле, и учитывать изменение характеристик за счет учета рекомбинационного тока в слое собственной проводимости, зависящего от солнечной иррадиации и значения подвижности зарядов [9].

Данная модель описывается формулой из работы [10]:

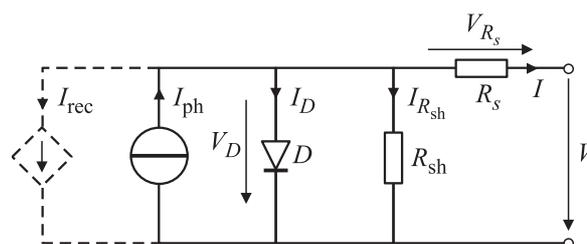
$$I = I_{ph} - I_{rec} - I_0 \left( e^{(V+I \cdot R_s)/mV_i} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (8)$$

где  $I$  — ток ячейки модуля,  $V$  — напряжение модуля,  $I_{ph}$  — фототок,  $I_0$  — темновой ток,  $R_s$  — последовательное сопротивление,  $R_{sh}$  — шунтирующее сопротивление,  $I_{rec}$  — фотоиндуцированный рекомбинационный ток, описывающий изменение ВАХ в результате фотоиндуцированной деградации [10]:

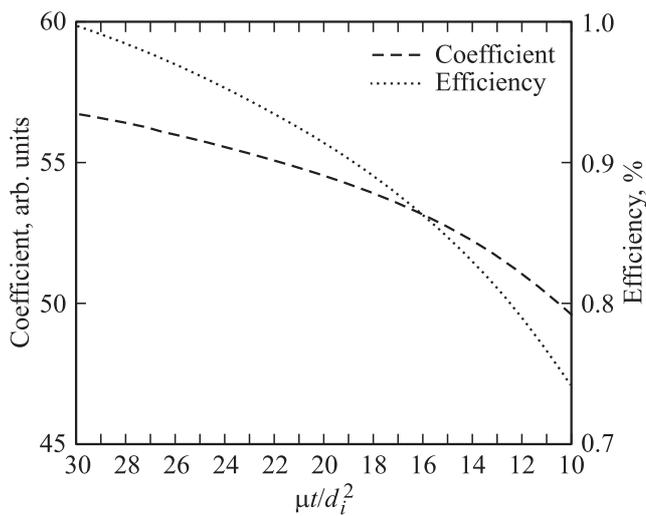
$$I_{rec} = \frac{I_{ph}}{(\mu\tau/d_i^2) (V_{bi} - (V + I \cdot P_s))}, \quad (9)$$

где  $\mu\tau/d_i^2$  — значение произведения подвижности и времени жизни заряда в слое собственной проводимости толщиной  $d_i$ ,  $V_{bi}$  — встроенный потенциал.

Применение однодиодной модели для двухпериодного фотоэлемента аморфный/микрорекристаллический кремний объясняется тем, что деградация после периода наблюдается в аморфном слое, в то время как свойства микрорекристаллического кремния остаются более стабильными. Таким образом, изменения характеристик модуля зависят от процессов, происходящих в аморфном слое и приводящих к изменению значения  $I_{rec}$ . Цель данной работы заключается в наблюдении динамических изменений в ВАХ фотоэлемента с применением наиболее



**Рис. 4.** Модифицированная однодиодная модель фотоэлемента [10].



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента наклона прямой точек МРРТ и эффективности от значения произведения подвижности и времени жизни заряда в слое собственной проводимости.

простого аппарата для достижения высокой точности описания состояния СЭ, для упрощения „стабильные“ характеристики аморфного и микрокристаллического кремния были линеаризованы и описаны одним диодом.

Таким образом, именно значение произведения подвижности и времени жизни заряда в аморфном слое собственной проводимости  $\mu\tau/d_i^2$  отображает степень деградации свойств модуля. Очевидно, что при снижении подвижности и времени жизни заряда эффективность работы модуля снижается, происходят соответственные изменения в ВАХ.

Для определения параметров модели была проведена минимизация функционала:

$$F = \left(1 - \frac{I_{sc\ est}}{I_{sc\ ref}}\right)^2 + \left(1 - \frac{V_{oc\ est}}{V_{oc\ ref}}\right)^2 + \left(1 - \frac{ff\ est}{ff\ ref}\right)^2, \quad (10)$$

где индекс „est“ относится к значениям, полученным при расчете с помощью модели, а индекс „ref“ — к реальным значениям. В качестве параметров в данной модели выступают величины  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $K$  и  $V_{bi}$ , где  $K = \mu\tau/d_i^2$ . Минимизация величины  $F$  по этим параметрам проводилась посредством генетического алгоритма (см. Приложение).

Параметры модели были подобраны для максимального соответствия ВАХ измеренным в лабораторных условиях в январе 2013 г. Полученные в результате работы генетического алгоритма параметры модели ячейки фотоэлектрического КТМ модуля представлены в табл. 1.

На рис. 5 представлен график результатов моделирования наклона прямой точек МРРТ при различных значениях произведения подвижности и времени жизни заряда в слое собственной проводимости аморфного кремния. Значения диапазона произведения подвижности и времени жизни заряда в слое собственной проводимости аморфного кремния выбраны в соответствии

**Таблица 1.** Параметры модели для ячейки КТМ модуля типа

$R_s$	[Ом]	0.086
$R_{sh}$	[Ом]	51.81
$V_{bi}$	[В]	1.344

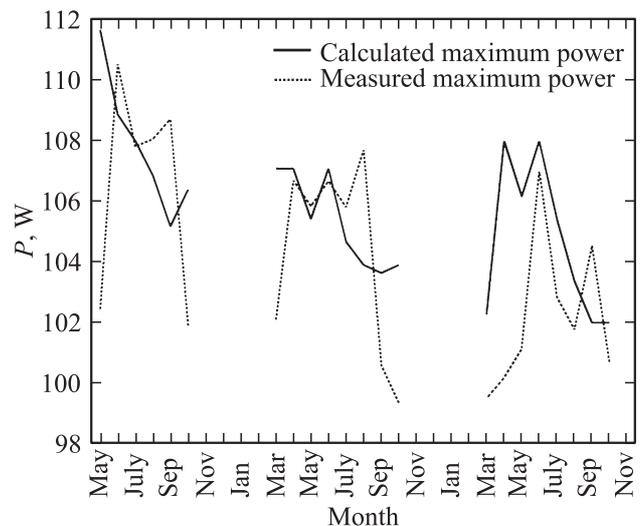
со значениями, представленными в статье [9]. Наклон графиков зависимости мощности генерируемой КТМ модулем от тока уменьшается по мере усиления деградации модуля: состоянию модуля в мае 2013 г. соответствует значение произведения подвижности и времени жизни заряда  $\mu\tau/d_i^2 = 20$ , в мае 2014 г. —  $\mu\tau/d_i^2 = 14$ . Разный характер изменения характеристик на рис. 3 и 5 объясняется разной скоростью и разнонаправленностью процессов деградации и отжига оборванных связей в реальных условиях.

#### 4. Результаты и выводы

Для проверки данного метода была проведена обработка данных мониторинга за период с мая 2013 г. по декабрь 2015 г., результат оценки изменения мощности модуля в процессе эксплуатации представлен на рис. 6.

В мае 2014 г. было произведено измерение характеристик модуля в лабораторных условиях. Измеренные параметры  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si КТМ модуля, вычисленные значения для мая 2014 г. и ошибка оценки представлены в табл. 2.

Величина ошибки оценки основных параметров КТМ модуля для мая 2014 г. не превысила 2%. Основными причинами ошибки оценки являются применение однодиодной модели фотоэлемента, в которой сопротивления



**Рис. 6.** Оценка изменения мощности  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si КТМ модуля в процессе эксплуатации (май 2013—ноябрь 2015). Разрывы обусловлены отсутствием достоверных данных для данных месяцев.

**Таблица 2.** Параметры КТМ модуля для мая 2014 г.

Параметр	Единицы измерения	Измеренные значения	Вычисленные значения	Ошибка
$P$	[Вт]	106.26	106.14	-0.11
$V_{mp}$	[В]	53.39	53.90	0.96
$I_{mp}$	[А]	1.99	1.97	-1.06
$V_{oc}$	[В]	70.31	69.85	-0.65
$I_{sc}$	[А]	2.50	2.46	-1.26
$ff$	[%]	0.61	0.62	1.83

принимаются неизменными, и неточная оценка температуры модуля на основе данных температуры среды и солнечного излучения. Кроме того, применение генетического алгоритма в качестве метода оптимизации не позволяет точно определить оптимум минимизируемой функции и любое решение является субоптимальным, хотя и близким к глобальному оптимуму.

## 5. Заключение

Данные мониторинга МРРТ могут быть использованы для оценки деградации модуля и прогнозирования генерации данного модуля в краткосрочной перспективе. Уровень погрешности расчетов (см. табл. 2) показывает целесообразность использования предложенной модели. Кроме того, для оценки не требуется установка пирометров и другого дорогостоящего оборудования, требуется лишь измерение тока и напряжения модуля в точке максимальной мощности, температуры модуля и обработка данных в программном комплексе на основе модели исследуемого модуля. Достигнутая точность оценки превышает точность методов, основанных на оценке процессов деградации и отжига оборванных связей под воздействием световой радиации и повышенных температур, в отличие от методов, основанных на экстраполяции данных предыдущих измерений мощности модуля. Метод позволяет учитывать разнонаправленность и разную скорость процессов деградации и отжига оборванных связей. Достигнутая точность расчета показывает допустимость использования однодиодной модели в данном случае. Для окончательного подтверждения эффективности применения предложенного метода следует продолжать мониторинг работы модуля и проводить контрольные измерения ВАХ в лабораторных условиях, а также проверить метод на большем количестве  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si модулей в различных климатических условиях.

## Приложения

### Описание генетического алгоритма

Первым этапом работы генетического алгоритма является генерация начального множества значений пара-

метров  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $K$ ,  $V_{bi}$ , формируемых случайным образом в предварительно указанных пределах.

Для отбора кандидатов решений применяется целевая функция (функция приспособленности), которая присваивает каждому набору параметров оценку, характеризующую отклонение получаемого по этому набору решения от оптимального. Целевая функция составлена таким образом, чтобы минимальное ее значение соответствовало оптимальному набору параметров: набору характеризующемуся минимальным отклонением от реальных значений  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  и  $ff$ :

$$F = \left(1 - \frac{I_{sc\,est}}{I_{sc\,ref}}\right)^2 + \left(1 - \frac{V_{oc\,est}}{V_{oc\,ref}}\right)^2 + \left(1 - \frac{ff_{est}}{ff_{ref}}\right)^2, \quad (П. 1)$$

где индекс „est“ относится к значениям, полученным при расчете с помощью модели, а индекс „ref“ — к реальным значениям.

Далее производится сортировка наборов по соответствующим оценкам от минимальной до максимальной и определяется множество худших наборов параметров, которые должны быть удалены из общего множества. Множество вариантов параметров дополняется новыми наборами, сгенерированными из оставшихся наиболее близких к оптимальному на данной итерации наборов путем их скрещивания, причем наивысшую вероятность скрещивания имеют наборы, близкие к лучшему набору параметров. Процесс скрещивания сводится к обмену значений отдельных параметров двух различных наборов [11]:

$$p_{new} = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2, \quad (П. 2)$$

где  $p_{new}$  — новое значение параметра,  $p_1$  и  $p_2$  — значения параметра из первого и второго наборов соответственно,  $\beta$  — некоторое число, такое, что  $0 \leq \beta \leq 1$ . Значения  $p_1$  и  $p_2$  предварительно также нормируются таким образом, чтобы  $0 \leq p_{1,2} \leq 1$ .

Скрещивание позволяет приблизить решение к оптимальному, т.е. к глобальному минимуму функции оценки, однако существует вероятность попадания в область локального минимума решения. При этом с увеличением количества итераций получаемое решение будет колебаться в окрестности локального минимума, так и не достигнув глобального. Для выхода из этой ситуации применяются две операции: мутация и интродукция. Операция мутации заключается в случайном изменении отдельных параметров из выбранных наборов. Интродукция позволяет внести новую информацию, путем внедрения в множество наборов параметров случайно сформированных наборов параметров.

После проведения всех операций, обозначенных выше, образуется новое множество наборов, над которым снова производятся операции отбора, скрещивания, мутации и интродукции, закливая процесс. Выход из цикла производится при отсутствии снижения значения функционала в результате последних  $n$  итераций.

## Список литературы

- [1] D.L. Staebler, C.R. Wronski. Appl. Phys. Lett., **31**, 292 (1977).
- [2] A. Kołodziej. Optoelectron. Rev., **12**, 21 (2004).
- [3] В.М. Емельянов, А.В. Бобыль, Е.И. Теруков. Письма ЖТФ, **39** (20), 40 (2013).
- [4] A. Carullo, F. Ferraris, A. Vallan, F. Spertino, F. Attivissimo. Measurement, **55**, 641 (2014).
- [5] M. Nikolaeva-Dimitrova, R.P. Kenny, E.D. Dunlop. Thin Sol. Films, **516**, 6902 (2008).
- [6] V. Sharma, O.S. Sastry, A. Kumar, B. Bora, S.S. Chandel. Energy, **72**, 536 (2014).
- [7] J. Merten, J. Andreu. Solar Energy Mater. Solar Cells, **52**, 11 (1998).
- [8] C. Schwingshackl, M. Petitta, J.E. Wagner, G. Belluardo. Energy Procedia, **40**, 77 (2013).
- [9] S. Voswinckel, V. Wesselak, B. Luster mann. Solar Energy, **92**, 206 (2013).
- [10] J. Merten, J.M. Asensi, C. Voz, A.V. Shah, R. Platz, J. Andreu. IEEE Trans. Electron Dev., **45** (2), 423 (1998).
- [11] R.L. Haupt, S.E. Haupt. *Practical genetic algorithms* (John Wiley & Sons, 2004).

Редактор А.Н. Смирнов

## Study on degradation of micromorph thin-film silicon ( $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si) solar modules: evaluation of the seasonal efficiency based on monitoring data

D.A. Bogdanov<sup>1,2,3</sup>, G.A. Gorbatovskii<sup>2</sup>,  
V.N. Verbitskii<sup>2</sup>, A.V. Bobyl<sup>2</sup>, E.I. Terukov<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Lappeenranta University of Technology,  
53850 Lappeenranta, Finland

<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St. Petersburg Academic University  
Nanotechnology Research and Education Center,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> R&D Center for Thin-Film Technologies  
in Energetics under the Ioffe Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194064 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The method for  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si photovoltaic modules efficiency evaluation based on the maximum power current and voltage measurements was designed. Described the technique of  $\alpha$ -Si/ $\mu$ c-Si modules parameters estimation during the operation after the initial degradation of the module, the results of the parameters evaluation compared the values measured in the laboratory. Parameters estimation error does not exceed 3% level, error of the maximum power in standard testing conditions is equal to 0.36%. This technique can be used for assessment of the effectiveness of the module and a short-term prediction (day, week) of the power generated by the solar power plant in operation condition using only standard monitoring tools.