

УДК 620.91+621.382+697.329+004.942

А.Ю.Гаевский, докт. физ.-мат. наук (Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев)

Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ

Предложен оптимизационный метод определения параметров фотоэлектрических модулей, в котором исходят из экспериментальной вольт-амперной характеристики (ВАХ). В качестве модельной функции, аппроксимирующей измеренную ВАХ, используется точное аналитическое решение $I(V)$, которое выражается через W -функцию Ламберта, зависящую от набора искомого параметров. Получены формулы для зависимости $I(V)$ и для начальных значений параметров, позволяющие уменьшить объем вычислений, повысить эффективность и точность оптимизации. С помощью предложенного метода и вычисляемых наборов параметров можно описывать не только одиночные фотоэлектрические ячейки и модули, но и различные схемы их соединений.

Запропоновано оптимізаційний метод визначення параметрів фотоелектричних модулів, вихідними даними в якому є експериментальні вольт-амперні характеристики (ВАХ). У якості модельної функції, що апроксимує експериментальну ВАХ, використовується точний аналітичний розв'язок $I(V)$ через W -функцію Ламберта, який залежить від набору шуканих параметрів. Отримано формули для $I(V)$ та для початкових значень параметрів, що дозволяють зменшити обсяг обчислень, підвищити ефективність і точність оптимізації. За допомогою запропонованого методу та наборів параметрів, що обчислюються, можна описувати не тільки одиночні фотоелектричні комірки та модулі, а й різні схеми їх з'єднань.

1. Введение и постановка задачи. При разработке и эксплуатации фотоэлектрических систем требуется точное знание параметров, от которых зависят нелинейные ВАХ фотомодулей и составляющих их фотоэлектрических ячеек (ФЭЯ) [1–3]. Эти характеристики обычно воспроизводятся с помощью электрических схем замещения с модельными параметрами, описывающими процессы генерации и рассеяния электрической мощности. Чаще всего используется однодиодная схема замещения ячейки (рис. 1) со следующими параметрами: фототок I_{ph} , генерируемый ячейкой; обратный ток насыщения I_s и коэффициент неидеальности n диода; паразитные последовательное R_s и параллельное R_p сопротивления [2, 3]. Знание этих параметров, а также их зависимостей от интенсивности освещения и температуры позволяет решать задачи оптимизации рабочего режима и эффективного управления фотоэлектрической системой, моделировать поведение системы при изменении внешних условий. Однако указанный набор параметров фотоэлектрических модулей, как правило, неизвестен пользователю, поскольку производители дают ограничен-

ную информацию об электрических характеристиках модулей (ток короткого замыкания (к.з.), напряжение холостого хода (х.х.), ток и напряжение точки максимальной мощности).

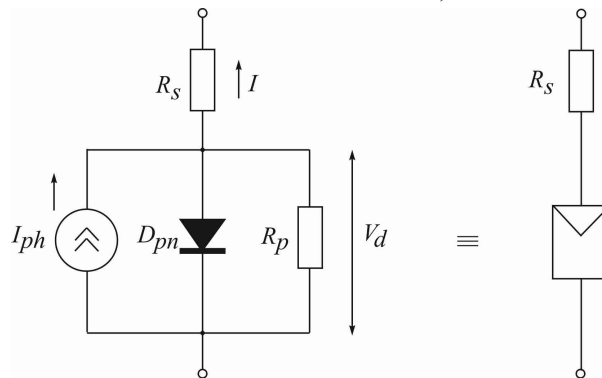


Рис. 1. Однодиодная электрическая схема замещения ФЭЯ.

Как известно, зависимость тока I в нагрузке от напряжения V выражается нелинейным уравнением [1, 2]:

$$I(\theta) = I_{ph} - \frac{V + I(\theta)R_s}{R_p} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{\beta}{n} (V + I(\theta)R_s) \right] - 1 \right\}, \tag{1}$$

где $\beta = \frac{q}{kT}$; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура; $\theta = \{I_{ph}, I_s, n, R_s, R_p\}$ –

набор параметров ФЭЯ, от которых зависят ток I и напряжение V . Параметры θ вычисляются на основе экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ). Существует множество методов "экстракции" параметров, разработанных для различных условий освещенности (стандартная солнечная радиация, частичное затенение, отсутствие радиации), для статического и динамического режимов работы, для различных типов нагрузки и т.д. В данной статье предложена процедура экстракции параметров θ из одного набора экспериментальных данных (I , V), которая основана на однодиодной модели ФЭЯ, работающей в статическом режиме, близком к стандартным тестовым условиям (Standard Testing Conditions – STC), при активной нагрузке и прямом смещении p - n перехода. Прежде чем описать предложенную процедуру экстракции параметров нелинейной электрической модели ФЭЯ, остановимся на возможных методах решения аналогичных задач, известных из литературы.

Прежде всего, эти методы различаются объемом экспериментальных данных, используемых для вычисления параметров. Минимальное число измерений определяется числом характеристических параметров в наборе θ . Согласно аналитическим методам [4–6], параметры вычисляются по формулам, исходя из измеренных значений напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, напряжения и тока в точке максимальной мощности, а также наклона касательной к кривой $I(V)$ в точках к.з. и х.х. В альтернативных аналитических методах вводятся вспомогательные интегро-дифференциальные функции [7–9], которые позволяют выделять эффект последовательного сопротивления R_s . Использование функции, представляющей интеграл тока по напряжению, уменьшает чувствительность процедуры "экстракции" параметров к экспериментальным ошибкам [10].

Более представительный набор экспериментальных данных в виде ВАХ позволяет вычислять параметры с использованием какой-либо оптимизационной модели [11–13]. Чаще всего это нелинейная оптимизация объектной функции, которая представляет собой сумму квадратов отклонений

измеренных значений от модельной кривой. Так при "вертикальной" оптимизации объектная функция выражается через отклонения по току (вдоль оси ординат I) [14]:

$$S(I, \theta) = \sum_{i=1}^m [I_i - I(V_i, \theta)]^2, \quad (2)$$

где I_i, V_i – экспериментальные значения тока и напряжения в точке i . Метод латеральной минимизации (по напряжению) был предложен в [15]. Однако этот метод лучше применять в случае больших сопротивлений R_s , и он не годится, если потери через шунт R_p велики. С целью уменьшения объема вычислений при оптимизационных процедурах зависимость $I(V)$ для конкретной ФЭЯ может интерполироваться сплайн-функциями [16]. Некоторые преимущества (уменьшение числа параметров на единицу) дает представление объектной функции через разности модельной и экспериментальной проводимостей [17]. В последние годы начал разрабатываться метод определения параметров с помощью точного решения уравнения (1) [10, 18]. Сравнение более чем двадцати различных методов расчета характеристических параметров ФЭЯ было выполнено в [19].

В настоящей работе для определения характеристических параметров построена процедура оптимизации по методу наименьших квадратов (МНК), причем в объектной функции (2) использовано точное решение нелинейного уравнения (1).

2. Аналитическое решение для ячейки.

Сложность определения параметров электрической схемы ФЭЯ заключается в существенной нелинейности уравнения (1), связывающего ток и напряжение на нагрузке. Минимизация функционала (2) в 5-мерном пространстве и нахождение корней уравнения (1) по итерационным схемам представляются довольно громоздкими. С целью упрощения алгоритма в данной работе используется точное решение нелинейного уравнения (1), выражаемое через W -функцию Ламберта. Эта функция по определению является решением следующего уравнения [20, 21]:

$$W e^W = x. \quad (3)$$

При действительных значениях правой части уравнение (3) имеет две ветви действительных решений $W_0(x)$ и $W_{-1}(x)$. Эти решения находят все более широкое применение во многих физических приложениях [19]. Будем искать W в виде:

$$W = A \exp \left[\frac{\beta}{n} (V + IR_s) \right], \quad (4)$$

где A – постоянная, которую нужно найти из условия обращения в нуль слагаемого $\sim I$ в показателе экспоненты уравнения (1). Подставив (4) в (1), получим соотношение:

$$I \frac{R_s + R_p}{R_p} = I_{ph} + I_s - \frac{V}{R_p} - \frac{I_s}{A} W \quad (5a)$$

и соответственно

$$W = A \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 - \frac{V}{I_s R_p} - \frac{I}{I_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \right]. \quad (5b)$$

Используя равенства (4) и (5a, б), получим выражение для левой части уравнения (3):

$$We^W = A \exp \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\beta}{n} - \frac{A}{I_s R_p} \right) V + \\ & + \left(\frac{\beta}{n} R_s - \frac{A(R_s + R_p)}{I_s R_p} \right) I + A \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \end{aligned} \right]. \quad (6)$$

Приравнявая нулю коэффициент при I , найдем

$$A = \frac{\beta I_s R_s R_p}{n R_s + R_p}. \quad (7)$$

В итоге точное решение уравнения (1) для ВАХ, выраженное через функцию Ламберта, имеет следующий вид:

$$I(V, \theta) = \frac{R_p}{R_s + R_p} (I_{ph} + I_s) - \frac{V}{R_s + R_p} - \frac{n}{\beta R_s} W(V, \theta), \quad (8)$$

где $W(V, \theta)$ – функция, зависящая от набора параметров θ и одного аргумента V :

$$W(V, \theta) \equiv W \left(\frac{\beta I_s R_s R_p}{n R_s + R_p} \exp \left(\frac{\beta R_s R_p}{n R_s + R_p} \left(I_{ph} + I_s + \frac{V}{R_s} \right) \right) \right). \quad (9)$$

Введем обозначение $\delta = \frac{R_s}{R_p}$ и воспользуемся

малостью отношения $\frac{I_s}{I_{ph}} \sim 10^{-9} - 10^{-6} \ll \ll 1$. Тогда

получим:

$$I(V, \theta) = \frac{1}{(1 + \delta)} \left(I_{ph} - \frac{V}{R_p} \right) - \frac{n}{\beta R_p \delta} W(V, \theta); \quad (10)$$

$$W(V, \theta) \equiv W \left(\frac{\beta I_s R_p \delta}{n (1 + \delta)} \exp \left(\frac{\beta (I_{ph} R_p \delta + V)}{n (1 + \delta)} \right) \right). \quad (11)$$

Здесь θ обозначает набор параметров $\theta = \{I_{ph}, I_s, n, \delta, R_p\}$. При записи этих формул пренебрегли членами, пропорциональными $\sim I_s$, в сравнении с членами $\sim I_{ph}$.

График основной ветви $W_0(x)$ при актуальных положительных значениях аргумента показан на рис. 2. При малых и больших аргументах x справедливы следующие приближенные оценки [20]:

$$W_0(x) \approx x \text{ при } x \ll 1; \quad (12a)$$

$$W_0(x) \approx \ln x \text{ при } x \gg 1. \quad (12b)$$

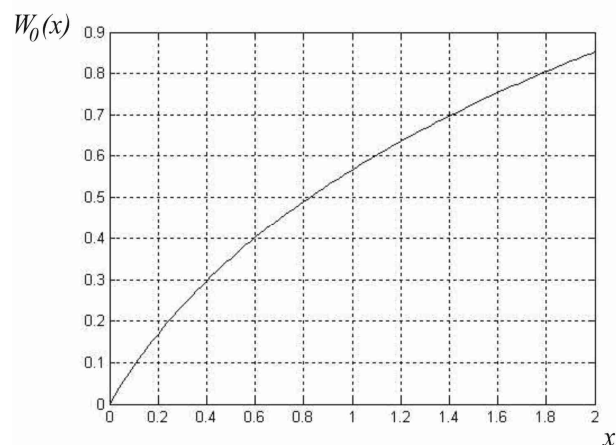


Рис. 2. Основная ветвь функции Ламберта $W_0(x)$ при $x > 0$.

Благодаря тому, что существует точное решение $I(V, \theta)$ (10), можно найти значения производной $\frac{\partial I}{\partial V}$, которая определяет углы наклона

ВАХ, в частности, в точках к.з. и х.х.:

$$\frac{\partial I}{\partial V} \equiv G = - \frac{1}{R_p (1 + \delta)} - \frac{n}{\beta R_p \delta} \frac{\partial W}{\partial V}. \quad (13)$$

Здесь и далее индекс ветви при W опускается. Учитывая, что производная функции Ламберта по аргументу x равна [20]:

$$\frac{dW}{dx} = \frac{W}{x(1+W)}, \tag{14}$$

получим:

$$\frac{\partial W}{\partial V} = \frac{\beta}{n(1+\delta)} \frac{W}{1+W};$$

$$G = -\frac{1}{R_p(1+\delta)} \left(1 + \frac{W}{\delta(1+W)} \right). \tag{15}$$

Анализ проводимости G (15) и поведения ВАХ в характерных точках приведен в разд. 4.

3. Решение для фотомодуля. Конструктивно фотомодуль состоит из набора полупроводниковых фотоэлектрических ячеек, которые обычно соединены последовательно согласно схеме, показанной на рис. 3. Параллельно цепи ячеек часто включаются два обводных диода (bypass diode) D_{bd} . Эти диоды открываются при появлении обратного смещения на ячейках, которые они шунтируют, и предотвращают эффект "темного пятна", возникающий при частичном затенении. В данной работе считается, что все ячейки одинаково освещены, поэтому обводные диоды закрыты и в расчетах рассматриваемых параметров их можно не учитывать.

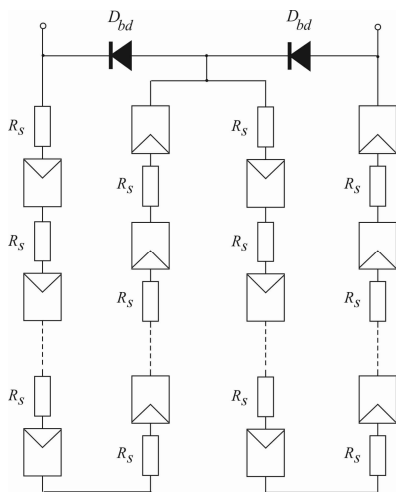


Рис. 3. Схема соединения ФЭЯ в фотомодуле.

Если считать, что все ячейки одинаковы, работают в одних и тех же условиях и каждая описывается однодиодной схемой замещения (рис. 1), ВАХ рассчитывается сравнительно просто. Фототок, генерируемый ячейками, распределяется следующим образом:

$$I_{ph} = I_d + I_p + I, \tag{16}$$

где I_d – ток через диод D_{pn} ; I_p – ток через шунт R_p . Напряжение на каждом из диодов равно:

$$V_d = \frac{V}{N_c} + IR_s, \tag{17}$$

где N_c – число ячеек в фотомодуле. В результате зависимость между током и напряжением на нагрузке описывается уравнением:

$$I(\theta) = I_{ph} - \frac{1}{R_p} \left(\frac{V}{N_c} + I(\theta)R_s \right) - I_s \left\{ \exp \left[\frac{\beta}{n} \left(\frac{V}{N_c} + I(\theta)R_s \right) \right] - 1 \right\}, \tag{18}$$

которое отличается от (1) лишь заменой V на $\frac{V}{N_c}$.

Набор параметров, от которых зависит ВАХ фотомодуля, тот же, что и для ФЭЯ: $\theta = \{I_{ph}, I_s, n, \delta, R_p\}$. Точное решение $I(V)$ для

фотомодуля с учетом соотношения $\frac{I_s}{I_{ph}} \ll 1$ пред-

ставляется формулами, аналогичными (10), (11). Запишем их для случая малых последовательных сопротивлений в сравнении с сопротивлениями утечки ($\delta \ll 1$):

$$I(V, \theta) = (1-\delta) \left(I_{ph} - \frac{V}{N_c R_p} \right) - \frac{n}{\beta R_p \delta} W(V, \theta); \tag{19}$$

$$W(V, \theta) \equiv W \left(\frac{\beta}{n} I_s R_p \delta \exp \left(\frac{\beta}{n} \left(I_{ph} R_p \delta + \frac{V(1-\delta)}{N_c} \right) \right) \right). \tag{20}$$

4. Оценка начальных значений параметров по ВАХ. Результат минимизации функционала (2) существенно зависит от выбора начальных значений параметров. Обычные процедуры минимизации основаны на итерационной схеме Ньютона, в которой вычисляются частные производные по параметрам. Для производной по шунтирующему сопротивлению из (1) имеем оценку

$$\left| \frac{\partial I}{\partial R_p} \right| \sim \frac{1}{R_p^2}. \text{ При больших } R_p \text{ ток } I \text{ не чувствителен к вариациям этого сопротивления, однако при уменьшении } R_p \text{ значение производной начинает быстро возрастать, что сказывается на результате поиска минимума. Таким образом, для разных начальных значений параметров, особенно } R_p, \text{ могут быть получены различные результаты. Кроме того, при малых } R_p \text{ (больших токах утечки) ток к.з. } I_{sc} \text{ отличается от фототока, и поэтому этот ток с осторожностью следует использовать для оценки параметра } I_{ph}.$$

Покажем, что значения сопротивлений R_p и R_s фотомодуля можно оценить по наклону ВАХ в окрестностях точек к.з. и х.х. Сначала из формул (19), (20) получим выражение для проводимости аналогично тому, как это делалось для ФЭЯ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial V} &= \frac{(\delta - 1)}{N_c R_p} - \frac{n}{\beta R_p \delta} \frac{\partial W}{\partial V} \approx \\ &\approx \frac{\delta - 1}{R_p} \left(\frac{1}{N_c} + \frac{W}{\delta(1+W)} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь, в отличие от (15), W есть функция от $\frac{V}{N_c}$ – напряжения, приходящегося на одну ячейку. Для оценок в качестве исходных параметров ФЭЯ возьмем значения, полученные в работах [22] и [17] для коммерческой кремниевой ячейки RTC (Radiotechnique Compelec, Франция) диаметром 57 мм: $I_{ph} = 0,76$ А; $I_s = 0,46$ мкА; $n = 1,456$; $R_s = 0,039$ Ом; $R_p = 41,91$ Ом. Коэффициент β при стандартных условиях измерения ($T_{STC} = 298$ К) равен $\beta_{STC} = 38,94$ В⁻¹, а при тем-

пературе 33°C, при которой проводились измерения [22], $\beta = 37,92$ В⁻¹.

Рассмотрим режим короткого замыкания, для которого при указанных выше значениях параметров аргумент функции $W(x)$ в формулах (21) равен:

$$\begin{aligned} x_{sc} &= \frac{\beta}{n} I_s R_p \delta \exp\left(\frac{\beta}{n} I_{ph} R_p \delta\right) \approx \\ &\approx 1,06 \cdot 10^{-6} \ll 1 \end{aligned} \quad (22)$$

и, следовательно, можно воспользоваться приближенным равенством (12а). Для проводимости фотомодуля получим:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V=0} &\equiv G_{sc} \approx -\frac{1}{R_p} \left(\frac{1-\delta}{N_c} + \frac{x_{sc}}{\delta} \right) = \\ &= -\frac{1-\delta}{R_p N_c} - \frac{\beta}{n} I_s \exp\left(\frac{\beta}{n} I_{ph} R_p \delta\right). \end{aligned} \quad (23)$$

При подстановке в это выражение реальных значений параметров увидим, что второе слагаемое в (23) примерно на два порядка меньше первого, и им можно пренебречь. Таким образом, если начальное значение сопротивления R_{p0} , необходимое для процедуры оптимизации, заранее неизвестно, то с погрешностью $\delta \sim 0,1\%$ можно брать значение

$$R_{p0} \approx - \left[N_c \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V=0} \right]^{-1}, \quad (24)$$

которое определяется из анализа ВАХ. С такой же погрешностью можно оценить фототок I_{ph} , взяв за его начальное значение ток короткого замыкания I_{sc} .

Как следует из (23), влияние R_p сказывается, прежде всего, на наклоне ВАХ вблизи к.з. ($V=0$). Проиллюстрируем это расчетом по формулам (19), (20), описывающим всю вольт-амперную характеристику. На рис. 4а показан пример семейства ВАХ фотомодулей с различными R_p и одинаковыми остальными четырьмя параметрами. Действительно, шунтирующее сопротивление сильно влияет при малых напряжениях и слабо сказывается на ВАХ при малых токах вблизи точ-

ки х.х. В то же время наклон ВАХ при х.х. определяется, в основном, последовательным сопротивлением R_s , что иллюстрируется рисунком 4б, где отображено семейство характеристик при разных R_s и одинаковых остальных параметрах.

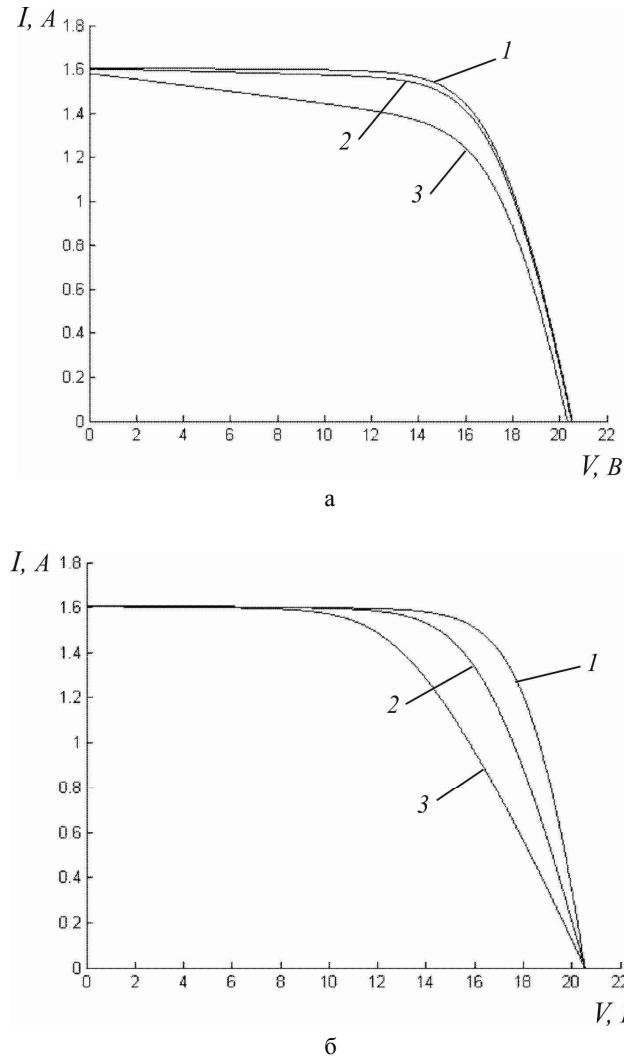


Рис. 4. ВАХ фотомодуля при различных R_p , R_s и одинаковых значениях остальных параметров: $I_{ph} = 1,61 A$; $I_s = 4,1 \cdot 10^{-8} A$; $n = 1,234$; $N_c = 36$; $a - R_s = 0,034 \text{ Ом}$; $R_p = 2 \text{ Ом}$ (кривая 1); $R_p = 10 \text{ Ом}$ (кривая 2); $R_p = 32 \text{ Ом}$ (кривая 3); б - $R_p = 32 \text{ Ом}$; $R_s = 0,02 \text{ Ом}$ (кривая 1); $R_s = 0,05 \text{ Ом}$ (кривая 2); $R_s = 0,1 \text{ Ом}$ (кривая 3).

Перейдем к режиму холостого хода. В этом режиме аргумент W -функции не мал, и неравенство (22) уже не выполняется. К примеру, для рассмотренных выше ячеек типа RTC:

$$x_{oc} = \frac{\beta}{n} I_s R_s \exp\left(\frac{\beta}{n} (I_{ph} R_s + (1 - \delta)v_{oc})\right) \approx 1,7, \quad (25)$$

где $v_{oc} = \frac{V_{oc}}{N_c}$ – напряжение х.х. на одной ФЭЯ.

При таком значении x , как следует из графика на рис. 2, $W \approx 0,78$. Тогда в формуле для $\frac{\partial I}{\partial V}$ (21)

второе слагаемое примерно на три порядка превышает первое, и справедливо приближенное равенство:

$$\frac{\partial I}{\partial V} \Big|_{V=V_{oc}} \equiv G_{oc} \approx -\frac{1 - \delta}{R_s} \frac{W}{1 + W}. \quad (26)$$

Отсюда видим, что наклон касательной к ВАХ при $I = 0$ определяется, в первую очередь, сопротивлением контактов R_s : чем оно меньше, тем круче характеристика в окрестности точки х.х. В пределе $R_s \rightarrow 0$ имеем:

$$\frac{\partial I}{\partial V} \Big|_{V=V_{oc}} = -\frac{\beta}{n} (1 - \delta) I_s \exp\left(\frac{\beta}{n} (1 - \delta)v_{oc}\right) \quad (27)$$

при $R_s \rightarrow 0$.

Для рассматриваемого в качестве примера фотомодуля этот предел равен $-22,48$, что соответствует углу наклона касательной $-87,5^\circ$.

При конечных значениях R_s необходимо учесть сложную зависимость W -функции от R_s через аргумент x_{oc} (25). На рис. 5 кривая 2 отображает проводимость холостого хода как функцию сопротивления R_s . На этом же графике штрихпунктиром 3 нанесена зависимость $G_{oc0} \sim -\frac{const}{R_s}$, отвечающая случаю, когда при вычислении используется постоянное значение W с номинальным $R_s = 0,039 \text{ Ом}$. Для иллюстрации показана также зависимость $W(R_s)$. Фактически особенность R_s^{-1} в G_{oc0} устраняется умножением на W , что и видно на графиках. Используя кривую 2 на рис. 5, можно по наклону касательной к ВАХ в точке х.х. определить начальное значение R_{s0} для оптимизации.

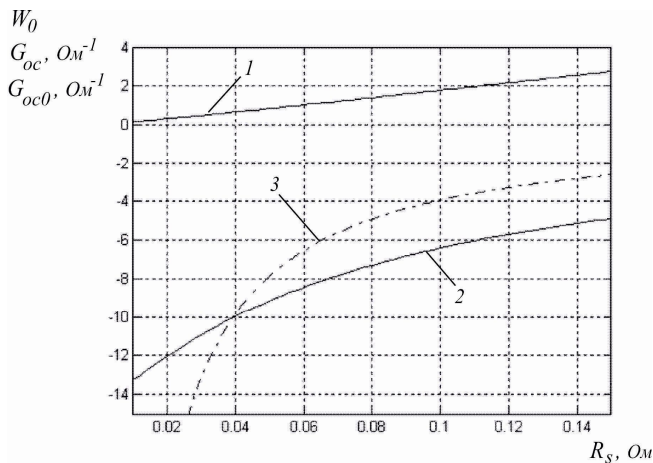


Рис. 5. Зависимости от R_s функции Ламберта и производной $\partial I/\partial V|_{V=V_{oc}}$ при фиксированных остальных параметрах: 1 – $W(R_s)$; 2 – $G_{oc}(R_s)$;

$$3 - G_{oc0} = - \frac{0,39}{R_s}.$$

Что касается остальных параметров, используемых в итерационном процессе, можно руководствоваться следующими соображениями. Для параметра неидеальности диода n разумные значения лежат в интервале $1,1 \div 1,5$, а стартовое значение обратного тока насыщения I_s с достаточной точностью определяется из темновой ВАХ фотомодуля.

5. Оптимизационная процедура. В настоящей работе параметры набора θ определялись из экспериментальных ВАХ путем нелинейной многомерной оптимизации объектной функции $S(I, \theta)$ (2) по методу Левенберга-Марквардта [23]. В качестве начальных параметров R_p, R_s брались значения, полученные из ВАХ по формулам (24), (26). Результатом расчетов, выполненных в MATLAB, являлись графики типа показанных на рис. 6. Для модулей SEM 70 ("S.E. Project", Италия), состоящих из $N_c = 36$ ячеек, мощности солнечного излучения 950 Вт/м^2 и температуре 34°C , получены следующие параметры: $I_{ph} = 1,602 \text{ А}$; $I_s = 6,13 \cdot 10^{-8} \text{ А}$; $n = 1,26$; $R_s = 0,029 \text{ Ом}$; $R_p = 2,46 \text{ Ом}$. Все параметры находятся в допустимых пределах, за исключением шунтирующего сопротивления R_p , малая величина которого вызвана, возможно, дефектами в $p-n$ переходе или

большими токами утечки через краевые поверхности модуля.

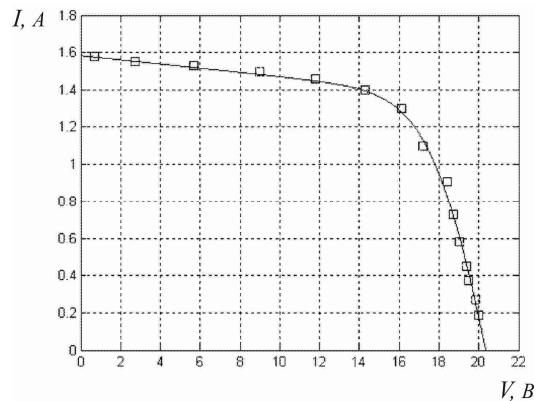


Рис. 6. Экспериментальная (□) и расчетная (сплошная линия) ВАХ фотоэлектрического модуля SEM 70.

Полученные описанным методом параметры могут быть использованы при моделировании вольт-амперных и мощностных характеристик различных схем соединения фотомодулей.

6. Результаты и выводы. 1. В данной статье разработан метод определения параметров схемы замещения фотоэлектрического модуля, в котором применяется многомерная нелинейная оптимизационная процедура. Исходными данными для нее являются экспериментальные значения тока и падения напряжения на нагрузке. Экспериментальная ВАХ аппроксимируется модельной кривой, являющейся точным аналитическим решением уравнения для $I(V)$ однодиодной схемы замещения ФЭЯ. Это решение выражается через W -функцию Ламберта, зависящую от напряжения и пяти параметров $\theta = \{I_{ph}, I_s, n, R_s, R_p\}$.

2. Подгонка модельной функции под экспериментальную ВАХ осуществляется путем минимизации в рамках МНК объектной функции $S(I, \theta)$. Поскольку в многомерном пространстве эта функция имеет множество локальных минимумов, большую роль играют начальные значения параметров θ , от которых стартует процесс минимизации. В статье получены формулы, позволяющие из экспериментальной ВАХ корректно определить начальные θ , которые приводят к искомому минимуму объектной функции.

3. Использование формул в рамках аналитического решения для ВАХ, предложенных в данной работе, позволяет уменьшить объем вычислений и повысить эффективность оптимизации. Ал-

горитм вычислений является более компактным, чем в обычных методах "экстракции" параметров [11–15], основанных на итерационном решении уравнения ВАХ методами, аналогичными методу Ньютона.

4. В данном методе не требуется априорное знание некоторых величин (к примеру, V_{oc} , I_{sc}), которые были бы задействованы в расчете как константы. Эти величины являются результатом оптимизации, т.е. определяются не по одной, а по нескольким экспериментальным точкам, что повышает точность метода.

5. С помощью разработанного метода экстракции определены параметры рабочего фотомодуля SEM 70 ("S.E. Project").

6. Однодиодная модель с параметрами, которые определяются предложенным методом, может описывать не только одиночную ФЭЯ, но и различные соединения ячеек и модулей.

1. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л: Наука, 1989. – 310 с.

2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

3. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices, 3-d edn. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2007. – 832 p.

4. Chan D.S.H., Philips J.R., Phang J.C.H. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters // Solid-State Electronics. – 1986. – No. 29. – P. 329–337.

5. Chan D., Phang J. Analytical methods for the extraction of solar cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. IEEE Trans. Electr Devices – 1987. – 34. – No.2. – P. 286–293.

6. Jia Q. X., Ebihara K., Ikegami T. Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics // Phil. Magazine B. – 1995. – No. 7. – P. 375–382.

7. Norde H. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance // Appl. Phys. – 1979. – No.50. – P. 5052–5053.

8. Sato K., Yasumura Y. Study of the forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance // Appl. Phys. – 1985. – 58, 3655–3657.

9. Lee J.I., Brini J., Dimitriadis C.A. Simple parameter

extraction method for non-ideal Schottky barrier diodes. Electron. Lett. 1998. – No. 34. – P. 1268–1269.

10. Ortiz-Conde A., Garcia Sánchez F.J., Muci J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2006. – No. 90. – P. 352–361.

11. Charles J.P., Abdelkrim M., Muoy Y.H., Mialhe P. A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells // Solar cells. – 1981. – No. 4. – P. 169–178.

12. Phang J., Chan C.H., Daniel S.H. A review of curve fitting error criteria for solar cell I-V characteristics // Solar cells. – 1986. – No. 18. – P. 1–12.

13. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers // Int. J. Sol. Energy. – 1986. – No. 4. – P. 1–12.

14. Ferhat-Hamida A., Ouennoughi Z., Hoffmann A., Weiss R. Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method // Solid-State Electronics. – 2002. – No. 46. – P. 615–619.

15. Ortiz-Conde A., Ma Y., Thomson J., Santos E., Liou J.J., Garcia Sánchez F.J., Lei M., Finol J., Layman P. Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method // Solid-St. Electron. – 1999. – No.43. – P. 845–848.

16. Kong K.C., Mamat M., Ibrahim M.Z., Muzathik A.M. New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel // Appl. Math. Sci. – 2012. – No. 6. – P. 381–401.

17. Chegaar M., Ouennoughi Z., Guechi F., Langueu H. Determination of Solar Cells Parameters under Illuminated Conditions // Electron Devices. – 2003. – No. 2. – P. 17–21.

18. Zhang C., Zhang J., Hao Y., Lin Zh., Zhu C. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve // J. Appl. Phys. – (2011), 110, 064504 (1-7).

19. Bashahu M., Nkundabakura P. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors, Solar Energy (2007), 81, No 7. – P. 856–863.

20. Corless R. M., Gonnet G. H., Hare D. E. G., Jeffrey D. J., Knuth D. E.. On the Lambert W function. Adv. Computational Maths. (1996), 5. – P. 329–359.

21. Дубинов А.Е. W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики. / ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2006. – 160 с.

22. Easwarakhanthan T., Bottin J., Bouhouch I., Boutrit C. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers // J. Sustainable Energy (1986). – No. 4. – P. 1–12.

23. Демиденко Е.З. Оптимизация и регрессия. – М.: Наука. 1989. – 296 с.