

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРИ НЕСТАНДАРТНОМ СПЕКТРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

О.В. Зинчук, М.С. Тиванов  
Научный руководитель — Н.А. Дроздов  
Белорусский государственный университет

Измерение параметров солнечных элементов (СЭ) предполагает освещение их излучением со спектром, совпадающим с солнечным и мощностью, соответствующей заатмосферному (стандарт AM0), либо прошедшему через атмосферу под различным углом (стандарты AM1, AM2 и т.д.). Поскольку работа с использованием естественного излучения затруднена погодными условиями и другими факторами (прозрачность атмосферы, концентрация водяного пара и т.п.), эксперименты проводятся в лабораторных условиях при использовании имитаторов — аттестованных приборов, спектр излучения которых близок к стандартизированному солнечному. Однако создание высокоточных имитаторов — достаточно сложный и дорогостоящий научно-технический процесс. Поэтому при проведении измерений, не требующих высокой точности, используются осветители — приборы, спектр излучения которых достаточно сильно отличается от спектра Солнца. Цель настоящей работы — разработка методики получения достоверных параметров СЭ при проведении измерений с помощью осветителя.

Суммарная плотность тока короткого замыкания  $i_{kz}$ , отдаваемого СЭ, в общем случае определяется произведением квантовой эффективности собирания носителей  $Q(\lambda)$  и спектральной плотности потока фотонов солнечного излучения  $\frac{dJ_s}{d\lambda}$  во всём спектральном диапазоне работы СЭ:

$$i_{kz} = e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) \frac{dJ_s}{d\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — границы чувствительности СЭ,  $e$  — заряд электрона.

Поскольку мы имеем дело не с солнечным излучением, а с нестандартным спектром осветителя, формула (1) была нами преобразована к выражению вида:

$$i_{kz} = eB \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) K(\lambda) \frac{dJ_l}{d\lambda} d\lambda, \quad (2)$$

где  $B$  — «коэффициент установки»,  $K(\lambda)$  — коэффициент пересчета спектров Солнца и осветителя.  $\frac{dJ_l}{d\lambda}$  — спектральная плотность потока фотонов излучения осветителя.

Коэффициент перехода от спектра Солнца к спектру осветителя определяется как  $K(\lambda) = \frac{dJ_s/d\lambda}{dJ_l/d\lambda}$ . Величина  $Q(\lambda) \frac{dJ_l}{d\lambda}$ , входящая в формулу (2), измерялась в ходе эксперимента как спектральная характеристика исследуемых образцов.

Коэффициент установки  $B$  находился при помощи СЭ с известными параметрами (в том числе и  $i_{kz}$ ), полученными при аттестации на имитаторе. Чтобы перейти от плотности тока короткого замыкания к самому току, достаточно плотность тока умножить на площадь СЭ.

Таким образом, при проведении измерений с использованием осветителя необходимо:

- снять спектральную характеристику фототока исследуемого СЭ;
- рассчитать ток короткого замыкания СЭ, пользуясь формулой (2);
- выставить интенсивность осветителя таким образом, чтобы ток короткого замыкания соответствовал рассчитанному;
- снять вольтамперную характеристику (ВАХ) СЭ;
- рассчитать КПД и другие параметры СЭ по стандартной методике.

Существует методика [1] определения параметров СЭ из нескольких ВАХ, снятых при различных интенсивностях облучения. При этом предполагается, что рассчитываемые из таких измерений параметры (последовательное  $R_s$  и параллельное  $R_p$  сопротивления, диодный коэффициент  $A$  и обратный ток  $I_0$  СЭ) не зависят от интенсивности освещения. Однако такое при-

ближение не всегда выполнимо [2,3]. Поэтому более предпочтительна методика определения параметров СЭ по единственной ВАХ

Уравнение, описывающее ВАХ СЭ, с учётом последовательного и параллельного сопротивлений и варьируемого диодного коэффициента имеет вид [2]:

$$I = I_0 - I_0 \left( \exp \left( \frac{e(U + IR_S)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{IR_S + U}{R_p} \quad (3)$$

где  $I$ ,  $U$  – измеряемые ток и напряжение,  $I_0$  – фототок СЭ,  $T$  – температура,  $k$  – постоянная Больцмана

Приняв ток короткого замыкания равным фототоку, т.е.  $I_{K3} \approx I_0$  (численное моделирование в программе MathCAD дало погрешность такого приближения для наиболее типичного СЭ порядка 4% при условии облучения AM1 и 6,5% при облучении, десятикратно превышающем интенсивность AM1) и продифференцировав уравнение (3) по  $U$  в точках ( $U = 0$ ,  $I = I_{K3}$ ) и ( $U = U_{XX}$ ,  $I = 0$ ), где  $U_{XX}$  – напряжение холостого хода, определяем (считая параметр  $A$  заданным) параметры СЭ:

$$R_S = -\frac{1}{2} \left[ \left( (\alpha - \beta)^2 + \frac{2q}{I_{K3}} (\alpha - \beta) + \left( \frac{U_{XX}}{I_{K3}} \right)^2 \right)^{1/2} + (\alpha + \beta) + \frac{U_{XX}}{I_{K3}} \right]$$

$$R_p = \frac{U_{XX}}{\frac{AkT}{e} - \frac{AkT}{e} + I_{K3}}, \quad I_0 = \frac{I_{K3}}{\gamma} - \frac{U_{XX}}{\gamma R_p}$$

где введены следующие обозначения:  $q = U_{XX} \frac{\gamma + 2}{\gamma} - 2AkT/e$ ,  $\gamma = \exp \frac{eU_{XX}}{AkT} - 1$ .

$\alpha = (I_U^{-1})|_{U=0}$ ,  $\beta = (I_U^{-1})|_{I=0}$  При этом предполагалось, что  $1 + \frac{R_S}{R_p} \approx 1$ . Очевидно, что по физическому смыслу  $\alpha$  и  $\beta$  – котангенсы углов наклона ВАХ к оси напряжения в точках ( $U = 0$ ,  $I = I_{K3}$ ) и ( $U = U_{XX}$ ,  $I = 0$ ) соответственно.

Теперь можно оценить верность предположенного значения параметра  $A$ , используя выражение, которое нетрудно получить, найдя экстремум функции площади  $S = IU$ :

$$A = \frac{e}{kT} \frac{(U_M - I_M R_S) \left( I_{K3} + I_0 - I_M - \frac{U_M}{R_p} \right)}{I_M - \frac{U_M}{R_p}}$$

где  $I_M$  и  $U_M$  – сила тока и напряжение, соответствующие точке наибольшей мощности.

Таким образом, имея световую ВАХ СЭ, мы можем рассчитать не только его КПД, но и выходные параметры элемента. Расчет параметров эталонного СЭ по предложенной методике показал хорошее соответствие значений  $R_S$ ,  $R_p$ ,  $I_0$ ,  $A$  паспортным.

Литература.

1. Бордина Н.М., Зайцева А.К., Стрельцова В.И. Определение параметров вольт-амперной характеристики фотопреобразователя. – Гелиотехника №1, 1977.
2. Евдокимов В.М. Расчёт последовательного и шунтирующего сопротивлений по вольт-амперной характеристике солнечного элемента. – Гелиотехника №6. 1972.
3. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987.