гармонического анализа [4]. При КЗ в статорной обмотке ААГ гармонические составляющие сигнала вибродатчика, установленного на корпусе генератора увеличиваются в 4 – 8 раз. Данный диагностический признак целесообразно использовать при построении защиты ААГ.

1. Богдан А.В. Обнаружение виткового замыкания в обмотке статора асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев, Н.С. Баракин // Сельский механизатор – М.: ООО «Нива», 2018. – № 7-8. С. 44 – 45.
2. Богдан А.В. Информационные признаки повреждения обмотки статора для построения релейной защиты автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Известия вузов. Электромеханика. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, 2017. – № 6. С. 72-76.
3. Баракин Н.С. Асинхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой статора [Текст]. / Н.С. Баракин, А.Н. Соболев, А.А. Кумейко // Сельский механизатор – М.: ООО «Нива», 2018. № 7-8. С. 48 – 49.
4. Богдан А.В. Измерение сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора У/УН-12 [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев, В.А. Богдан // Сельский механизатор, – М.: ООО «Нива», 2018. № 11. С. 40 – 41.
5. Богдан А.В. Информационные признаки повреждения обмотки статора для построения релейной защиты автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Известия вузов. Электромеханика. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, 2017. – № 6. С. 72-76.

Харченко В.В.¹, Никитин Б.А.¹, Панченко В.А.^{2,1}, Тихонов П.В.¹

Спектральные характеристики фотопреобразователя как основа определения его КПД адекватного спектральному солнечному излучению

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

²Российский университет транспорта МИИТ
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-05-2020-35

idsp: ljjournal-05-2020-35

Аннотация

В работе описано определение спектральных значений КПД фотоэлектрического преобразователя для всех монохроматических полос. Представлены экспериментальные данные монохроматического облучения кремниевого фотопреобразователя. Также в статье представлены теоретическая и экспериментальная зависимости КПД кремниевого фотоэлектрического преобразователя от длины волны монохроматического излучения. Предлагаемая методика полезна в случаях сомнений относительно результатов измерений на обычных измерительных установках.

Ключевые слова: солнечная энергетика, эффективность, фотоэлектрические преобразователи, спектральная плотность, длина волны.

Abstract

The paper describes the determination of the spectral values of the efficiency of the photoelectric converter for all monochromatic bands. The experimental data of monochromatic irradiation of a silicon photoconverter are presented. The article also presents the theoretical and experimental dependences of the efficiency of a silicon photoelectric converter on the wavelength of monochromatic radiation. The proposed method is useful in cases of doubt regarding the results of measurements on conventional measuring systems.

Keywords: solar energy, efficiency, photoelectric converters, spectral density, wavelength.

Используемые для аттестации фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и солнечных электрических модулей [1] искусственные источники света (имитаторы) по своему спектральному составу не соответствуют солнечному освещению АМ 1,5, директивно установленному МЭК [2]. Поэтому получаемые с помощью таких имитаторов характеристики преобразователей, в том числе и коэффициент полезного действия (КПД), нельзя считать адекватными излучению АМ 1,5 [3 – 5]. Следует отметить, что даже натуральные измерения характеристик ФЭП под лучами Солнца не являются аргументом адекватности, поскольку солнечный спектр меняется в зависимости от времени суток, даты, состояния атмосферы и широты местности.

Решение поставленной задачи представляется возможным путём пересчета экспериментальных данных, получаемых с помощью мощного (около 100 солнц по токовому фотоотклику ФЭП) импульсного осветителя, имеющего сплошной спектр в границах поглощения преобразователя, и комплекта 15-ти светофильтров, с полосами пропускания равномерно распределенных в фотоактивной части спектра. Использование этих светофильтров позволяет освещать ФЭП монохроматическим потоком фотонов достаточно большой мощности. Большая мощность импульсного осветителя позволяет создавать уровни освещенности ФЭП монохроматическими потоками порядка 1000 Вт/м².

Снятие вольтамперных характеристик ФЭП при импульсной засветке позволяет определить такие важные параметры преобразователя, как ток короткого замыкания $I_{K3\lambda i}$, напряжение холостого хода $U_{X\lambda i}$, оптимальные значения рабочего тока $I_{p\lambda i}$ и напряжения $U_{p\lambda i}$, а последним и максимальную мощность ФЭП на заданной светофильтром длине волны:

$$\Delta P_{\lambda i} = I_{p\lambda i} \cdot U_{p\lambda i} . \quad (1)$$

Величина $I_{K3\lambda i}$ однозначно определит спектральную плотность тока короткого замыкания, которая с учетом коэффициента пропускания данного светофильтра позволит оценить спектральную мощность данного монохроматического потока $\Delta R_{\lambda i}$ путем сопоставления с соответствующей спектральной плотностью эталонного ФЭП, тарированного в условиях АМ 1,5 на данной λ_i :

$$\Delta R_{\lambda i} = \bar{k}_{\lambda i} \frac{i_{K3\lambda i}}{i_{эм.K3\lambda i}} \cdot \frac{\Delta \lambda_i}{T_{\lambda i}} , \quad (2)$$

где $T_{\lambda i}$ – коэффициент пропускания светофильтра с заданной длиной волны;

$\Delta \lambda_i$ – ширина полосы пропускания данного светофильтра;

$i_{K3\lambda i}$ и $i_{эм.K3\lambda i}$ – спектральные плотности токов короткого замыкания исследуемого и эталонного (тарированного) ФЭП.

$\bar{k}_{\lambda i}$ – средняя в пределах $\Delta \lambda_i$ спектральная энергетическая плотность солнечного излучения АМ 1,5.

Отношение выражения 1 (полезная мощность) к выражению 2 (затраченная мощность) позволяет определить спектральные значения КПД ФЭП для всех монохроматических полос, соответствующих выбранному комплекту светофильтров:

$$КПД_{\lambda i.снект} = \frac{\Delta P_{\lambda i}}{\Delta R_{\lambda i}} . \quad (3)$$

Корректное значение КПД для условий АМ 1,5 исследуемого ФЭП находится как среднеарифметическое значение спектральных КПД с учетом весовой доли энергии каждой полосы светового потока АМ 1,5 к его интегральному значению, т.е. 1000 Вт/м².

$$КПД_{AM1,5} = \sum \frac{\Delta\lambda_{i,ш} \cdot \bar{k}_{\lambda_i}}{1000} \cdot КПД_{\lambda_i.спект}, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda_{i,ш}$ – шаговое значение полосы, равное разности реперных значений полос пропускания последующего и предыдущего светофильтров.

В качестве примера использования предлагаемой методики в таблице 1 приведены экспериментальные данные монохроматического облучения кремниевого ФЭП от импульсного ксенонового имитатора через 15 светофильтров с полосами пропускания от 0,4 мкм до 1,1 мкм с шагом 50 нм.

Таблица 1.

Экспериментальные данные монохроматического облучения кремниевого фотопреобразователя

Длина волны	Средняя удельная плотность мощности АМ 1,5	Спектральные значения КПД ФЭП
λ_i , мкм	G_{λ_i} , Вт/см ² ·нм	КПД, %
0,30	2,296	0
0,35	24,524	0
0,40	47,49	2
0,45	71,204	3
0,50	77,977	5
0,55	76,692	7,5
0,60	72,436	8,5
0,65	70,274	11,5
0,70	59,263	13
0,75	54,026	15
0,80	50,621	17
0,85	48,338	18,5
0,90	39,671	21
0,95	21,206	22,5
1,00	34,961	25
1,05	33,34	26
1,10	19,086	19
1,15	13,217	5
1,20	22,035	0

На рисунке 1 представлен спектр стандартного солнечного излучения АМ 1,5 (1000 Вт/м²). В верхней части рисунка представлены мощности световых потоков длиной волны λ_i с шагом 50 нм фотоактивной области спектра для кремниевых ФЭП.

Рис.1 – Спектр стандартного солнечного излучения АМ 1,5

Отдельно на рисунке 2 представлена экспериментальная спектральная зависимость КПД ФЭП. Следует отметить, что ее максимум (26,4 %) лежит в области длин волн около 1,05 мкм, выше которой резко снижается до нуля (при 1,2 мкм). В этой области кремний становится прозрачным. Сама зависимость весьма близка к прямой линии, пересекающей ось аргумента в области 0,35 мкм, что можно объяснить влиянием некоторой толщины легированного слоя ФЭП, в котором полностью поглощаются все коротковолновые фотоны.

Рис.2 – Теоретическая и экспериментальная зависимости КПД кремниевого ФЭП от длины волны монохроматического излучения при его мощности 1000 Вт/м^2

О высоком (около 1000 Вт/м^2) уровне освещённости преобразователя на каждой монохроматической полосе говорит достаточно высокое значение напряжение холостого хода (около 0,6 В) и соответствующее значение мощности световых потоков.

Пересчитанное значение КПД ФЭП на основе его спектральных значений согласно выражению 4 для стандартного уровня освещенности АМ 1,5 составило величину 10 %.

Предлагаемая методика может быть полезна в случаях достаточных сомнений относительно результатов измерений на обычных измерительных установках, когда за критерий “одного Солнца” принимается равенство фотоотклика в виде тока короткого замыкания от используемого имитатора при АМ 1,5, соответствующему фотоотклику предварительно тарированного (эталонного) ФЭП.

1. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), С. 20 – 29
2. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets. Solar Energy, v.30, №6, 1983, p. 563-573.
3. Никитин Б.А., Гусаров В.А. Анализ стандартного спектра наземного солнечного излучения интенсивностью 1000 Вт/м^2 и оценка на его основе ожидаемых характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика, М.: НПП “Квант”, №24-25, 2008-2009 гг., с. 50-60.
4. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества, UNESCO-BRESCE 2007, – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
5. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V., Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules // Advances in Intelligent Systems and Computing, 866, 2019, p. 328-336. doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_34.