

УДК 629.7.064.56

К.В. БЕЗРУЧКО, С.В. ГУБИН, С.В. СИДЕНКО, А.О. ДАВИДОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АТТЕСТАЦИИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Рассмотрены особенности метрологической аттестации фотоэлектрических преобразователей в условиях космического полета и воспроизведение их характеристик в наземных лабораторных условиях для паспортизации и сертификации фотоэлектрических батарей космического применения.

фотоэлектрический преобразователь, метрология, испытания, система энергоснабжения, космический летательный аппарат

Введение

Разработка космической техники Украины в направлении соответствия мировым стандартам требует применения энергетических установок на основе солнечных батарей и высокоэффективных фотопреобразователей (ФП) [1]. Появление на современном рынке новых типов фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе полупроводниковых гетероструктур GaAs, GaInP₂, GaAlP и др. на германиевой подложке потребовало определенных изменений в области метрологии их характеристик. Применение двух или трех переходов в ФП позволило значительно расширить их спектральную чувствительность (рис. 1) и значительно повысить коэффициент полезного действия [2]. Для паспортизации ФП с широкополосной спектральной чувствительностью необходимо применение только высокоточных имитаторов солнечного излучения, основанных на газоразрядных лампах высокого давления [3]. Однако при настройке имитаторов такого типа важным является соответствие спектральной чувствительности метрологического фотопреобразователя, по которому ведется настройка, и исследуемого [4]. Создание метрологических фотопреобразователей для работ по космической энергетике проводится постоянно. Подобные проекты реализовывались в Советском Союзе на косми-

ческих аппаратах серии «Космос» и др. [5], неоднократно проводились подобные эксперименты в США. Аналогичная задача возникла перед отечественными разработчиками агрегатов космических солнечных энергосистем в процессе создания солнечных батарей на основе фотопреобразователей космического назначения (ФПКН). Однако в рамках имеющихся космических экспериментов на серийных космических аппаратах (КА) «Січ», «Океан» и др. данную задачу разрешить не представляется возможным по ряду организационных, технических и финансовых причин. В то же время в рамках проектов молодежных микроспутников такая программа может быть достаточно просто реализована с измерениями в космическом пространстве. Вопросы метрологии и аттестации ФП в космосе и рассматриваются в данной работе.

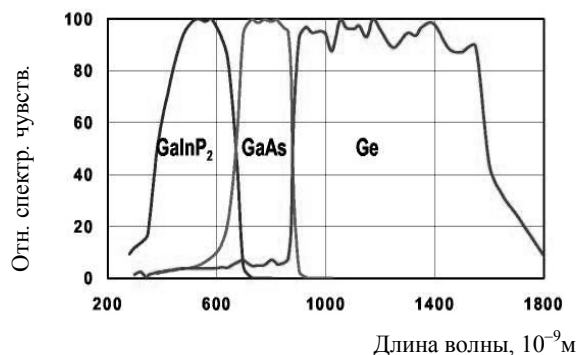


Рис. 1. Спектральная чувствительность трехпереходного фотоэлектрического преобразователя

Формулирование проблемы. Метрологическая аттестация ФП нового типа тесно связана с сертификацией энергетических параметров солнечных батарей, выполненных на новой элементной базе. В настоящее время метрологические характеристики и параметры деградации таких ФП требуют постоянного достоверного подтверждения в космических условиях. Основной проблемой получения характеристик метрологического ФП является непосредственно организация космического эксперимента, согласование его результатов с данными, получаемыми в наземных условиях, и последующим использованием этих данных в наземных стендовых испытаниях, обработке и исследованиях новой элементной базы солнечной фотоэнергетики [6].

С середины 90-х годов ХАИ активно решает задачи метрологии и сертификации фотопреобразователей и фотоэлектрических батарей космического назначения. К настоящему времени создано современное аттестационное оборудование, которое позволяет определять характеристики фотопреобразователей и малоразмерных солнечных батарей (рис. 2) [7]. Оборудование включает и метрологические фотопреобразователи (рис. 3), однако они отработаны только в условиях лабораторных экспериментов в рамках совместных работ с Государственным Научно-производственным объединением «Метрология» [8].

Теоретическое обоснование лабораторной аттестации метрологических ФП заключается в следующем. При настройке имитатора солнечного излучения по образцовому (эталонному) фотоэлектрическому преобразователю (ОФП) добиваются, чтобы ток короткого замыкания образцового ФП на имитаторе $I_{им}^{об}$ был равен току в стандартных условиях внеатмосферных $I_{стан}^{об}$ (АМ0). Эти токи могут быть определены по формулам:

$$I_{им}^{об} = F^{об} \int_0^{\infty} R_{им}(\lambda) \cdot S^{об}(\lambda) \cdot d\lambda ;$$

$$I_{стан}^{об} = F^{об} \int_0^{\infty} R_{стан}(\lambda) \cdot S^{об}(\lambda) \cdot d\lambda ,$$

где $R_{им}(\lambda), R_{стан}(\lambda)$ – спектральные плотности интенсивности имитатора и стандартного внеатмосферного солнечного излучения соответственно; $S^{об}(\lambda)$ – спектральная чувствительность образцового ФП.



Рис. 2. Установка для испытаний и сертификации фотопреобразователей



Рис. 3. Образцовый метрологический фотопреобразователь

После настройки имитатора производится паспортизация исследуемых ФП, т.е. измеряются вольтамперные характеристики (ВАХ) и фиксируются токи короткого замыкания, равные:

$$I_{им}^{иссл} = F^{иссл} \cdot \int_0^{\infty} E_{им}(\lambda) \cdot S^{иссл}(\lambda) d\lambda .$$

Таким образом, для проведения сертификации необходимо располагать ОФП или придать одному из ФП статус образцового.

В случае отсутствия ФП, имеющего градуировку на естественном солнечном излучении (условия космоса АМ0), имеется два варианта реализации ОФП:

1) с помощью компаратора, в состав которого входит аттестованный имитатор солнечного излучения;

2) методом последовательных приближений по измерениям на реальном солнечном излучении.

Проблема градуировки ФП по второму варианту является практически одной из разновидностей задачи поэлементной метрологической аттестации селективных приемников, которая может быть решена двумя независимыми методами: на основе спектрорадиометрического подхода и на основе интегральных радиометрических измерений [6].

Спектрорадиометрический подход основан на использовании источников излучения с известным распределением спектральной плотности энергетической освещенности.

Расчетным путем определяется интегральное значение энергетической освещенности в заданном спектральном диапазоне, соответствующем диапазону интегральной чувствительности исследуемого приемника:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot d\lambda .$$

При интегральном методе размерность единицы энергетической освещенности ($Вт/м^2$) передается исследуемому приемнику от неселективного абсолютного радиометра с учетом спектральной чувствительности исследуемого приемника и спектрального состава излучения источника, используемого для передачи размерности единицы.

В условиях отсутствия спектрорадиометрического эталона и исходя из специфики использования ФП представляется наиболее рациональной методика определения тока короткого замыкания ФП в стандартных условиях по измерению абсолютной спектральной чувствительности с дальнейшим пересчетом по этим данным.

Ток короткого замыкания ОФП (во внеатмосферных условиях) может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{кз} &= F^{об} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\oplus}(\lambda) \cdot S_{абс}^{об}(\lambda) \cdot d\lambda = \\ &= F^{об} \cdot g_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\oplus}(\lambda) \cdot S_{отн}^{об}(\lambda) \cdot d\lambda , \end{aligned}$$

где $F^{об}$ – площадь фоточувствительной поверхности ОФП; E_{\oplus} – плотность потока стандартного (внеатмосферного или наземного) солнечного излучения; $S_{абс}^{об}(\lambda)$, $S_{отн}^{об}(\lambda)$ – абсолютная и относительная спектральная чувствительность ОФП, соответственно; g_m – масштабный множитель.

Отсюда следует, что для определения спектральной характеристики чувствительности ФП необходимо произвести измерение относительной спектральной характеристики чувствительности ФП и определить масштабный множитель.

Измерение спектральной чувствительности ФП проводится методом замещения, т.е. путем ее сопоставления с показаниями чувствительного образцового приемника.

Определение относительной спектральной чувствительности ФП проводится путем сравнения реакций ФП к излучению с произвольной длиной волны λ с реакцией его к излучению с заранее выбранной длиной волны λ_0 , при которой относительная спектральная чувствительность принимается за единицу.

Абсолютная спектральная чувствительность определяется при одной длине волны λ_0 . Для осталь-

ных длин волн абсолютная спектральная чувствительность рассчитывается через относительную:

$$S(\lambda_i) = S(\lambda_0) \cdot S_{OIH}(\lambda_i).$$

Погрешность измерения рассматривается как складывающаяся из двух групп погрешностей, одна из которых присуща самой установке, а другая зависит от свойств исследуемых приемников.

В процессе метрологической аттестации определяются погрешности, обусловленные свойствами самой установки. При этом погрешность градуировки приемников по излучению образцового или эталонного источника, представляющего собой модель абсолютно черного тела, складывается из следующих независимых составляющих:

- * погрешности определения энергетической яркости светимости образцового источника;
- * погрешности определения расстояний между измерительной диафрагмой источника и приемником;
- * погрешности определения площади измерительной диафрагмы;
- * погрешности измерения выходного сигнала образцового приемника.

Из перечисленных погрешностей в результате аттестации ОФП в космических условиях исключаются первые три составляющие, что позволяет получить эталон с очень высокой точностью.

Решение проблемы

Идея решения проблемы состоит в разработке комплекта метрологических фотопреобразователей (МФП), который включает бортовые МФП и их аналоги (по выходным характеристикам) – наземные МФП.

Разработанный комплект проходит лабораторную аттестацию по усовершенствованной методике, которая предусматривает сравнение характеристик, определение допустимых различий и погрешность бортовых и наземных МФП.

Следующим этапом разрабатываются бортовая платформа космического аппарата для установки МФП, причем производится оценка ориентируемого и неориентируемого варианта. В состав платформы входят образцовые неселективные приемники солнечного излучения (пиргелиометры) и модуль электроники, обеспечивающий: измерение выходных параметров МФП и пиргелиометров, хранение результатов измерений, передачу их в канал телеметрии и управление по каналу телеуправления.

Созданная платформа должна проходить испытания совместно с аппаратурой космического аппарата на массово-габаритную, электрическую и электромагнитную совместимость по основным параметрам в стендовых условиях. Для обработки характеристик МФП, полученных по телеметрии, создается специальное программное обеспечение (СПО), позволяющее анализировать суточные и последующие изменения выходных параметров МФП. На основе этих данных проводится сравнительный анализ и подтверждение начальных характеристик лабораторных МФП и характеристик деградации бортовых МФП.

Для реализации проекта рассматривается два варианта.

Первый вариант проекта включает моноблочное построение платформы, которая устанавливается на верхней части МС, при этом освещенность фотопреобразователей изменяется в соответствии с законами орбитального движения аппарата (рис. 4).

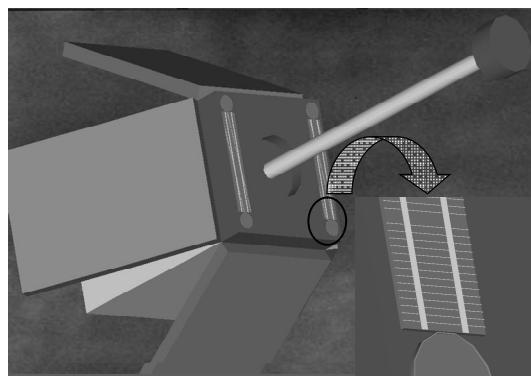


Рис. 4. Моноблочная платформа

Второй вариант включает ориентируемое построение платформы, установленной также на верхней части МС с двумя степенями свободы, что позволит обеспечить требуемый в данный момент времени уровень освещенности МФП (рис. 5).

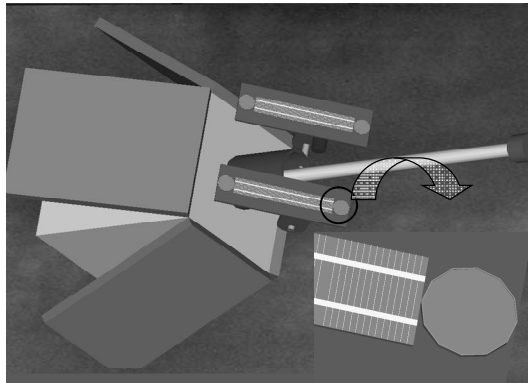


Рис. 5. Ориентируемая платформа

Модуль электроники может быть реализован также в двух вариантах: первый организуется по «жесткой» логике с максимальным использованием вычислительных возможностей имеющегося бортового компьютера микроспутника и каналов телеметрического управления (ТМУ) и телеметрического измерения (ТМИ); второй предполагается реализовать на основе высокоинтегрированных микроконтроллеров с соответствующим программным обеспечением и минимальным использованием бортовой электроники микроспутника.

Вариант моноблочной платформы обладает следующими достоинствами:

- малые массогабаритные параметры;
- низкое энергопотребление;

и недостатками:

- постоянно изменяющимся уровнем освещенности.

Вариант с ориентируемой платформой имеет достоинство в обеспечении постоянства освещенности, однако имеет худшие массогабаритные и энергетические характеристики.

Блок электроники с жесткой логикой (рис. 6) обладает простотой схемотехнического решения, но не

позволяет проводить какие-либо изменения в измерениях по ходу космического эксперимента.

Микроконтроллерный блок электроники (рис. 7) обладает гибкой логикой управления эксперимента, однако требует дополнительных затрат на разработку встроенных программ.

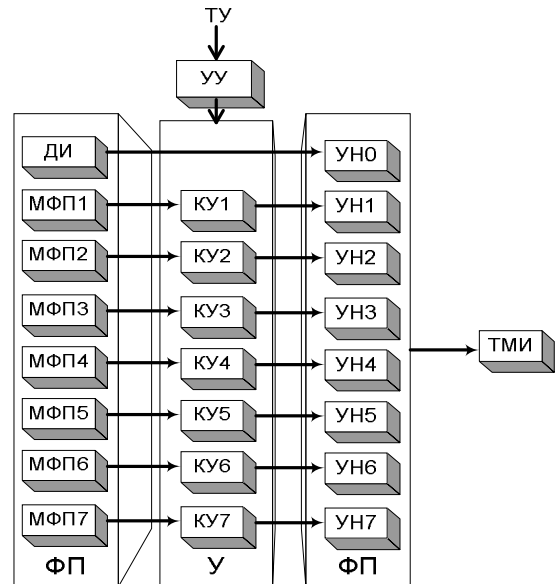


Рис. 6. Схема с жесткой логикой:

ДИ – образцовый датчик солнечного излучения; КУ – коммутационное устройство; УН – усилитель-нормализатор; УУ – устройство управления; ТУ – телеуправление; ТМИ – телеметрическое измерение

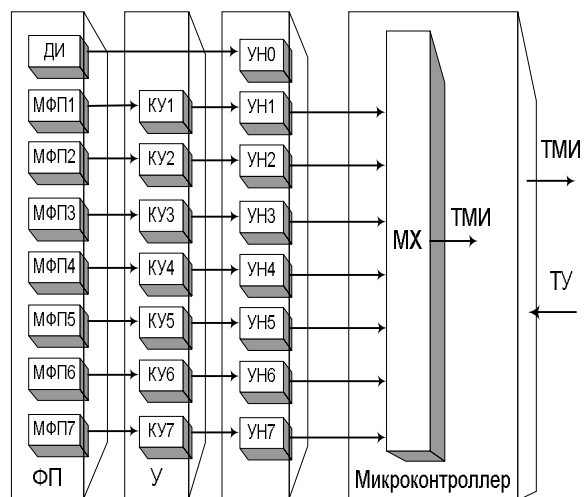


Рис. 7. Схема с микроконтроллером:

ДИ – образцовый датчик солнечного излучения; КУ – коммутационное устройство; УН – усилитель-нормализатор; УУ – устройство управления; ТУ – телеуправление; ТМИ – телеметрическое измерение; МХ – мультиплексор

Заключение

Выбор технического решения для реализации аттестации МФП в космических условиях основывается на оптимальном сочетании массогабаритных, энергетических, логических, экономических и надежных характеристик. Для реализации перечисленных требований наиболее выгодным является вариант неориентируемой платформы с микроконтроллерным электронным блоком. Однако, применение ориентируемой платформы позволит получить контрольные результаты значительно быстрее, что может быть немаловажным для применения совершенно новых типов ФП.

Таким образом, настройка имитатора солнечного излучения для сертификации новых типов ФП может проводиться непосредственно после получения телеметрических данных с борта космического аппарата, сопоставления характеристик МФП наземного комплекса с его космическими аналогами и корректировки настройки по данным космической аттестации. Предлагаемый метод позволит надежно и эффективно оценить не только метрологические характеристики, но и даст возможность получить необходимые данные по коррекции коэффициента деградации ФП в условиях реального космического полета.

Литература

1. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К.В. Безручко, Н.В. Белан, Д.Г. Белов и др. / Под ред. акад. НАН Украины С.Н. Конюхова. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – 15 с.

2. Spectrolab Photovoltaic Products: Triple-Junction Terrestrial Concentrator Solar Cells: [Electronic resource]. – 2002. – Mode of access: <http://www.spectrolab.com> (27.11.2006).

3. Колтун М.М., Оршанский И.С. Метрология солнечных элементов // Гелиотехника. – 1981. – № 3. – С. 3-13.

4. Вопросы метрологической аттестации испытаний агрегатов автономных наземных солнечных систем электроснабжения / К.В. Безручко, Д.Г. Белов, С.В. Губин и др. // Праці V науково-практ. конф. з питань розвитку й впровадження техніки і технології використання нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії. – К., 1996. – С. 70-72.

5. Далицкий Г.С., Дорохина Т.П., Каган М.Б. Исследование оптических и метрологических характеристик солнечных элементов, установленных на межпланетных автоматических станциях "Венера" // Гелиотехника. – 1983. – № 2. – С. 7-10.

6. Грачева И.В., Иванов А.И., Колтун М.М. Селективные радиометры для настройки солнечных имитаторов // Светотехника. – 1981. – № 4. – С. 11-12.

7. Метрологические аспекты экспресс-анализа электроэнергетических характеристик фотоэлектрических преобразователей / К.В. Безручко, С.В. Губин, А.А. Екимов и др. // Матеріали науково-техн. конф. "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань". – Х.: ДНВО "Метрологія", 1995. – С. 256-257.

8. Губин С.В., Екимов А.А. Конструктивные особенности образцового средства измерений освещенности и температуры на основе кремниевого фотопреобразователя // Матеріали науково-техн. конф. "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань". – Х.: ДНВО "Метрологія", 1995. – С. 258-259.

Поступила в редакцию 20.11.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.В. Замирец, Научно-исследовательский институт технологии приборостроения Национального космического агентства Украины, Харьков.