

# ИМИТАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ — ТЕХНОЛОГИЯ И СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ

## SOLAR ARRAY SIMULATION — TECHNOLOGY AND SYSTEM INTEGRATION

Вэйн Ванденберг (Wayne Vandenberg)

### ВВЕДЕНИЕ

Преобразование света в электро-энергию с помощью солнечных батарей оказалось эффективным способом иметь надежный источник энергии. Количество наземного и космического оборудования, требующего электропитания от солнечных батарей, увеличивается. Для тестирования этого оборудования нужны устройства, точно воспроизводящие уникальные характеристики солнечных батарей. Солнечные батареи имеют уникальные вольт-амперные (ВАХ) и выходные характеристики, которые могут меняться в зависимости от окружающей среды и условий эксплуатации, таких как температура, освещенность, скорость вращения, затенение. Поскольку тестировать электрические устройства с помощью реальных солнечных батарей довольно неудобно, производители контрольно-измерительного оборудования создали имитаторы солнечных батарей (ИСБ), которые оптимизированы для корректного тестирования электрических устройств, питающихся от таких батарей.

В данной статье рассказывается об уникальных характеристиках, которыми следует руководствоваться при выборе ИСБ. Так, правильный выбор ИСБ для тестирования оборудования космического аппарата (КА) позволит избежать опасности некорректной работы блока управления и распределения питания КА (PCDU), а следовательно — проблем с его электронным оборудованием. Имитатор должен иметь ВАХ, полностью совпадающую с ВАХ солнечной батареи КА. Таким образом, нам следует четко разобраться с тем, каким образом с помощью имитатора можно добиться безопасной и надежной работы, чтобы обеспечить необходимый «запас прочности» окончательной конструкции.

Последующие разделы данной статьи описывают характеристики солнечных батарей, методы имитации, используемые имитатором Agilent E4360, и аспекты системной интеграции.

### 1. ИМИТАЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Основными преимуществами использования ИСБ вместо реальной солнечной батареи являются удобство и гибкость работы. Основным недостатком является тот простой факт, что лю-



### Agilent Technologies

бое электронное устройство имеет принципиальные ограничения в динамических характеристиках.

#### 1.1. ПРЕИМУЩЕСТВА ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Солнечные батареи КА работают в условиях быстрых и значительных изменений освещенности и температуры, оказывающих сильное влияние на их производительность и КПД. При этом температура является фактором окружающей среды, а затенение — рабочим фактором, вызванным условиями полета. Поскольку тестирование происходит на земле, имитатор должен точно воспроизводить работу батареи в космосе для того, чтобы убедиться в способности PCDU исправно и эффективно работать на орбите.

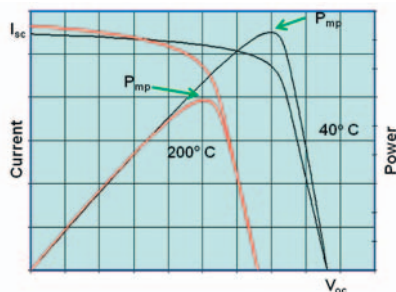


Рис. 1. Влияние температуры на выходную мощность

На рисунке 1 показано, как уменьшается выходная мощность при увеличении температуры. Обратите внимание, насколько резко падает напряжение холостого хода ( $V_{xx}$ ) при увеличении температуры: это вызвано увеличением проводимости полупроводника, из которого состоят солнечные элементы, что приводит к уменьшению напря-

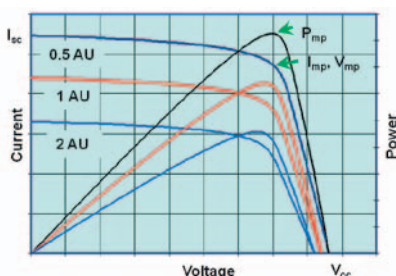


Рис. 2. Влияние освещенности на выходную мощность

жения и, следовательно, выходной мощности.

Изменения освещенности оказывают сильное влияние на ток короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) и слабое — на напряжение  $V_{xx}$ , как показано на рис. 2. Это вызвано увеличением плотности потока фотонов, падающих на солнечную панель при усилении солнечного излучения. В космосе объем падающего излучения зависит от угла падения, расстояния до Солнца и затенения, вызванного космическими телами и вращением КА.

Очень важно выбрать ИСБ, позволяющий запрограммировать выходные характеристики для моделирования изменений условий в полете. На практике следует убедиться в том, что настройки скорости изменения кривой и выдержки времени позволяют добиться реалистичного моделирования таких условий, как затенение и скорость вращения.

#### 1.2. ОГРАНИЧЕНИЯ

Основным ограничением для электронного блока питания, используемого для имитации выходного напряжения и тока солнечной батареи, является скорость изменения его выходных параметров. Лучше всего иметь имитатор, у которого скорость изменения выходных параметров на порядок выше, чем скорость обновления в схеме PCDU. Имейте в виду, что для ИСБ под скоростью обновления подразумевается два понятия:

1. Насколько быстро ИСБ изменяет характеристические кривые для имитации изменяющихся условий эксплуатации.
2. Насколько быстро ИСБ перемещает рабочую точку по выходной характеристике для имитации изменения нагрузки.

#### 1.3. ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Требования к динамической характеристике PCDU значительно выше, чем могут обеспечить стандартные источники питания постоянного тока. Стандартный источник питания должен поддерживать стабильное выходное напряжение при высокой выходной емкости. А ИСБ, наоборот, должен работать как источник быстро изменяющегося тока с низкой выходной емкостью и практически без переходных явлений. Лучшим показателем качества

ИСБ является то, насколько близко он способен воспроизвести реальные характеристики солнечного элемента, панели, батареи.

**2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ**  
**2.1. ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ**

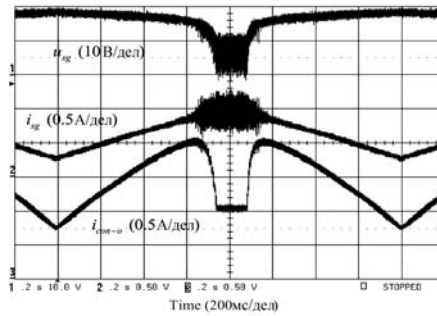
На рисунках 3а-3г сравниваются временные зависимости выходного тока и напряжения имитатора Agilent E4360A и солнечной панели Raloss SR30-36, для которой производитель указал следующие номинальные значения при интенсивности облучения 1 кВт/м<sup>2</sup> и температуре панели 25 °С: I<sub>кз</sub> = 1,91 А; V<sub>хх</sub> = 21,81 В; I<sub>мм</sub> = 1,76 А; V<sub>мм</sub> = 17,49 В.

В ходе эксперимента панель освещалась искусственным источником света, интенсивность облучения которого составляла 500 Вт/м<sup>2</sup>, что приблизительно равно солнечному облучению на поверхности Марса. Выходное напряжение панели, подключенной к преобразователю напряжения, измерялось при меняющемся выходном токе. Затем выходной ток панели, подключенной к преобразователю тока, измерялся при меняющемся выходном напряжении [1]. Период свипирования составлял примерно 2 секунды. Затем панель заменили имитатором и снова выполнили измерения. В ходе тестирования для ИСБ были установлены следующие характеристики имитатора Agilent E4360A и секции солнечной батареи VeriColombo MTM APR [2]. Управление батареей осуществляется в трех режимах:

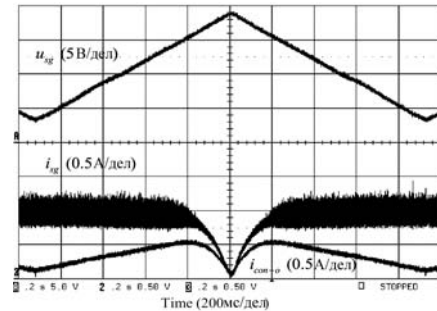
• Режим контроля точки максимальной мощности (MPPT), в котором напряжение главной шины выше напряжения рабочей точки батареи, и поэтому она отдает максимальную мощность.  
• Режим напряжения, в котором напряжение главной шины выше напряжения рабочей точки батареи, а шине требуется напряжение, величина которого находится между напряжением холостого хода (V<sub>хх</sub>) и напряжением максимальной мощности (V<sub>мм</sub>).  
• Режим шунтирования, в котором напряжение главной шины ниже напряжения рабочей точки батареи.

**2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ**

Помимо проверки того, что ИСБ обеспечивает необходимый ток и напряжение в необходимое время, следует удостовериться в том, что его выходное сопротивление совпадает с выходным сопротивлением имитируемой солнечной панели. Для соответствия критерию стабильности Найквиста для интерфейса между двумя преобразователями, выходное сопротивление имитатора должно, в идеальном случае, быть меньше, чем входное сопротивление PCDU.

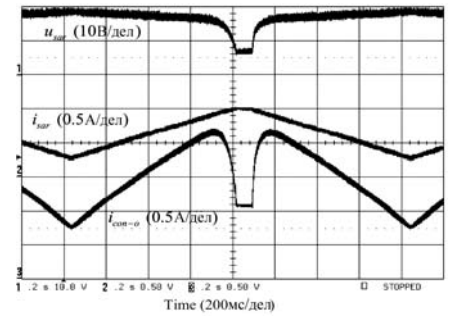


**Рис. 3а. Выходное напряжение панели при изменении выходного тока от 0,25 А до 0,92 А и обратно**

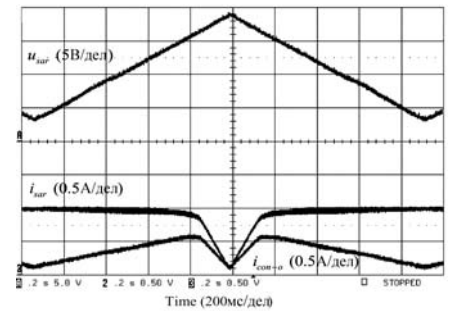


**Рис. 3б. Выходной ток панели при изменении выходного напряжения от 4 В до 18 В и обратно**

$u_{ср}$  – V<sub>вых</sub> панели,  $i_{ср}$  – I<sub>вых</sub> панели,  $i_{ср-0}$  – I<sub>вых</sub> преобразователя,  $u_{ср-0}$  – V<sub>вых</sub> преобразователя



**Рис. 3с. Выходное напряжение ИСБ при изменении выходного тока от 0,25 А до 0,92 А и обратно**



**Рис. 3г. Выходной ток ИСБ при изменении выходного напряжения от 4 В до 18 В и обратно**

несколько имитаторов в многоканальную систему. При этом чтобы добиться надежной и корректной работы системы, следует учесть ряд соображений.

**3.1. ВЫДЕЛЕНИЕ И ОТВОД ТЕПЛА**

При установке нескольких ИСБ в одну стойку серьезной проблемой становится отвод выделяемого тепла. Суммарное тепловыделение системы зависит от нескольких факторов:

- От внутренней архитектуры используемых имитаторов. Линейные источники питания — более быстроредействующие, чем импульсные, но их КПД значительно ниже.
- От схемы регулирования, используемой в PCDU. В режиме шунтирования происходит преобразование неиспользуемой электрической энергии в тепловую, которая будет рассеиваться прибором.
- От условий нагрузки, поскольку, чем больше энергии потребляется вне стойки, тем больше тепла рассеивается внутри стойки.

В крупных системах с большим количеством ИСБ суммарное тепловыделение может достигать 10 кВт и более.

Таблица 1

**СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЫХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ VERICOLOMBO MTM И ИМИТАТОРА AGILENT E4360A**

Параметр	Секция солнечной батареи	Факт. значение на выходе ИСБ	Секция солнечной батареи	Факт. значение на выходе ИСБ
Расстояние до Солнца		1,13 а.е.		0,314 а.е.
Рабочая температура солнечной батареи, °С	40		200	
1. Дифференциальное сопротивление источника питания dV/dI при P <sub>мм</sub> , Ом	30	33	4,6	4,4
2. Дифференциальное сопротивление источника питания dV/dI в при токе около I <sub>кз</sub> , Ом	520	500	68	70
3. Дифференциальное сопротивление источника питания dV/dI при V <sub>хх</sub> -V <sub>мм</sub> , Ом	4	6,22	1,4	1,77



В силу этого, простого охлаждения стойки с помощью вентиляторов будет явно недостаточно. Необходимо обеспечить каналы для подачи холодного и отвода нагретого воздуха, а также поддерживать температурный режим в испытательной лаборатории или в самой стойке. На рис. 4 показан зазор высотой 1 стандартный модуль для улучшения конвективного теплообмена.

### 3.2. ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКУ ПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Имитаторы солнечных батарей являются очень энергоемкими приборами. Например, чтобы обеспечить питанием стойку высотой 2 м, полностью занятую имитаторами, потребуется трехфазная сеть напряжением 208 или 220 В. В зависимости от количества выходных каналов, может потребоваться две линии ввода переменного тока.

### 3.3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Поскольку солнечные батареи состоят из последовательно и параллельно подключаемых модулей, то имитаторы также могут подключаться последовательно и/или параллельно для увеличения, соответственно, напряжения или тока. Однако при этом следует учитывать ряд ограничений, характерных для этих устройств.

Идеальные источники тока не очень хорошо переносят последовательное

соединение, поэтому при последовательном подключении ИСБ, руководствуйтесь следующими указаниями:

- Не превышайте максимальное входное напряжение относительно земли, указанного для устройства.
- Избегайте регулирования в режиме шунтирования.
- Приветствуется большая разница между  $I_{\text{мм}}$  и  $I_{\text{кз}}$ .

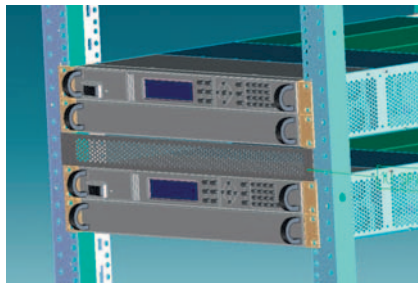


Рис. 4. Дополнительный воздухозаборный канал высотой 1 стандартный модуль для лучшего охлаждения двух блоков ИСБ

И напротив, идеальные источники тока прекрасно себя ведут при параллельном соединении, которое рекомендуется для повышения суммарной выходной мощности крупной солнечной батареи [3]. Вот что нужно учитывать при параллельном подключении:

- Выходная емкость всегда увеличивается, а выходное сопротивление уменьшается.
- При использовании длинных кабелей, обладающих большей индуктивностью, отключение нагрузок имеет более отрицательный эффект, чем добавление нагрузок на шину.

• Лучше иметь достаточный запас между токами  $I_{\text{мм}}$  и  $I_{\text{кз}}$ , особенно при использовании режима шунтирования, где происходит включение и отключение множества устройств. Возникающие при этом переходные процессы могут вызвать срабатывание защиты ИСБ по току.

### 3.4. СХЕМЫ ЗАЩИТЫ

Устройства защиты следует оценивать по их совместимости с тестовым оборудованием и космическим аппаратом.

- На уровне прибора следует четко уяснить специфику защиты по току и защиты от перенапряжений. Уточните, каковы задержки и уставки срабатывания, возможны ли в

системе кратковременные коммутационные броски тока и может ли пропускаемая энергия ( $I^2t$ ) привести к повреждению испытуемого устройства.

- На уровне системы лучше иметь второй, независимый контур защиты. В нем можно использовать полупроводниковые предохранители или реле, обладающие большим быстродействием, но меньшей изолирующей способностью, чем электромеханические аппараты защиты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестирования аппаратуры космических аппаратов требуется все более совершенное оборудование и процедуры. Имитаторы солнечных батарей — это специальные источники постоянного тока, способные моделировать динамичные ВАХ реальных солнечных батарей. Необходимо внимательно подойти к выбору имитаторов при покупке и интеграции их в систему, чтобы обеспечить защиту своих инвестиций в космические аппараты и наземное оборудование.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Suntio, Teuvo; Maki, Anssi; Leppaaho, Jari; Valkealahti, Seppo. (2011). On the Validation of Photovoltaic Interconnection Converters. IEEE Transactions on Power Electronics. University of Tampere, Finland.
2. Roeder, Reinhard. (2010). BepiColombo Electrical Power Subsystem Specification BC-ASD-SP-00028, European Space Agency BepiColombo Satellite Programme. EADS Astrium, Friedrichshafen, Germany.
3. Seipel, Winn. (2008). Sequential Shunt Regulation Application Note 5989-9791EN. Agilent Technologies, Budd Lake, NJ, USA.
4. Schmitz, Clegg, Carroll (2011) A Practical Guide to Solar Array Simulation and PCDU Test, European Space Conference proceedings. ☑

*Satellites are high complexity devices that require sophisticated test equipment and procedures. Solar Array Simulators are specialized DC power sources designed specifically to emulate the dynamic I-V output characteristics of a real photovoltaic array. This article describes the unique characteristics that should guide the choice of the SAS. The sections of this article describe the characteristics of a solar array, the emulation techniques used by the Agilent E4360 SAS, and considerations for systems integration.*

### ДАТЧИКИ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ДЖОЙСТИКИ



В основе автоматизации любого оборудования лежит использование различных датчиков и преобразователей. Особенно актуальной является проблема увеличения производительности небольших и недорогих машин. Более чем 40 лет MEGATRON представляет на мировом рынке экономичные механические и электрические преобразователи (датчики).



КАТАЛОГИ ПРОДУКЦИИ НА САЙТЕ [WWW.IRIT.RU](http://www.irit.ru)



«ИРИТ»: Москва, 115211,  
Каширское шоссе, дом 55, корпус 1  
Телефон/факс: (495) 781-79-97  
E-mail: sale@irit.ru  
Internet: http://www.irit.ru

