

К. В. БЕЗРУЧКО, д. т. н.,  
С. В. ГУБИН,  
А. А. ЕКИМОВ,  
И. Б. ТУРКИН, к. т. н.,  
Ю. А. ШЕПЕТОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА КОМПЛЕКСНОМ СТЕНДЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ХАИ

Анализ опыта работы различных специализированных и научных организаций /1/ позволяет утверждать, что в настоящее время существует достаточно совершенные и научно обоснованные методики расчета статических характеристик солнечной батареи (СБ) как первичного источника энергии системы электроснабжения (СЭС) космического аппарата (КА). Подобные методики обеспечивают возможность решения разнообразных задач проектирования, испытаний и эксплуатации СЭС. В тоже время, проведенный анализ публикаций /2..4/ показал, что не существует общепринятой теории и доступных данных для моделирования динамических характеристик СБ при расчете переходных процессов во время совместной работы СБ и импульсных регуляторов выходной мощности.

Расчет переходных процессов необходим при синтезе схемных решений для проверки граничных условий в оптимизационных задачах или оценки качества регулирования. Ограничиваясь только изучением влияния характеристик СБ на переменные составляющие тока и напряжения в СЭС, следует отметить, что повышение мощности высокочастотных гармоник для них особенно неприемлемо из-за удаленности СБ от регуляторов, так как приводит к повышению энергопотерь и увеличению уровня радиопомех. Кроме того, из-за существенной нелинейности характеристик СБ и других компонентов СЭС возможно возникновение автоколебаний в системе.

Развитая инфраструктура комплексного экспериментального стенда систем электроснабжения космических аппаратов, созданного в ХАИ, применение современных средств автоматизации научных исследований на основе систем сбора данных и управления Advantech позволяют исследовать самые разнообразные процессы в СЭС КА, в том числе и переходные процессы в электрических цепях при регулировании выходной мощности СБ.



Цель проведения экспериментальных исследований переходных процессов в электрических цепях при импульсном регулировании выходной мощности СБ - регистрация зависимости тока и напряжения в элементах схемы от времени для определения влияния на переменные составляющие тока и напряжения режимных параметров при различных вариантах построения регулятора мощности СБ, а также для идентификации динамической модели СБ.

Экспериментальные исследования выполнены на подсистеме для исследований масштабной модели СБ многоцелевого экспериментального стенда. В состав исследуемой схемы входят 2 параллельно включенные панели фотопреобразователей, каждая из которых состоит из 15 последовательно соединенных групп. Освещенность СБ регулируется изменением расстояния между СБ и осветителем (имитатором Солнца), а температура поддерживается системой термостабилизации, состоящей из девяти кондиционеров типа БК-1500. Погрешность стабилизации заданных уровней освещенности и температуры поверхности СБ не превышает 5% (при неравномерности по площади панели температуры менее 4% и освещенности - 2%).

Проведение эксперимента потребовало создания специфических средств измерения, обеспечивающих высокое быстродействие и точность измерения переходных процессов. Для достижения требуемого быстродействия в лаборатории разработан специализированный прибор для регистрации переходных процессов, в состав которого входят: входной делитель и коммутатор аналоговых сигналов, быстродействующий прецизионный АЦП, блок памяти и схема согласования и управления. Технические характеристики прибора обеспечивают измерение напряжения в диапазоне:  $-1.022 \dots 1.022\text{В}$  при погрешности измерений, не превышающей 0.3%. Входной делитель позволяет расширить диапазон измеряемых напряжений до  $-102.2 \dots 102.2\text{В}$ . Время преобразования не превышает 0.8 регистрацию токов и напряжений в схеме в течение 1.6 мс.

В результате проведенного экспериментального исследования получены характеристики токов и напряжений, характер которых определяется особенностями схемных решений и режимных параметров регулятора мощности СБ. На рис.1 приведена зависимость токов и напряжений от времени при использовании импульсного регулятора мощности параллельного типа.

Качественный анализ переходных процессов токов и напряжений при параллельном способе регулирования выходной мощности СБ позво-



ляет сделать следующие заключения:

-в реальной системе существуют "просечки" - короткие импульсы значительной амплитуды, жестко связанные с фронтом и спадом импульсов управления силовыми ключами. Возникновение импульсов связано с наличием реактивных составляющих полупроводниковых элементов схемы регулирования;

-существует колебательность токов и напряжений СБ при открытом состоянии силового ключа. Снижение длины кабеля приводит к увеличению времени затухания;

-наблюдается выброс в область отрицательных токов и напряжений СБ при открытом состоянии транзисторного ключа.

Результаты экспериментальных исследований при импульсном регулировании выходной мощности СБ использованы для построения динамической модели СБ - вольт-фарадной характеристики  $C_{сб}(U_{сб})$ .

Традиционная схема замещения СБ для расчета переходных процессов представляет собой параллельно соединенные источник фототока  $I_{\phi}$ , нелинейную емкость  $C(U)$ , образованную диффузионной и барьерной емкостями, и нелинейную проводимость  $g(U)$ .

Барьерная  $C_{\sigma}$  и диффузионная  $C_{д}$  емкости, могут быть представлены следующими уравнениями [3]:

$$C_{\sigma} = \frac{C_{\sigma_0}}{\left[1 - \frac{U}{\varphi_Z}\right]^n}, \quad C_{д} = \frac{I_0}{m_d \varphi_T 2\pi f} \exp\left[\frac{U}{m_d \varphi_T}\right],$$

где  $I_0$  - ток насыщения:

$$I_0 = 0.25 q n v \exp\left[-\frac{q\varphi_Z}{k T}\right],$$

$\varphi_T = kT/e$  - температурный потенциал перехода,

$\varphi_Z$  - контактная разность потенциалов.

Известно, что для полупроводникового диода, смещенного в прямом направлении, величину барьерной емкости можно принять постоянной. Таким образом, зависимость емкости фотозлектрической батареи при постоянной температуре может быть определена:

$$C_{сб}(U_{сб}) = C_{\sigma_0} + C_{д_0} \exp(k_u U_{сб}).$$

Численные значения  $C_{\sigma_0}$ ,  $C_{д_0}$ ,  $k_u$  для панели СБ, использовавшейся в эксперименте, определены аппроксимацией экспериментальных данных по всему множеству реализаций.

С учетом известных данных о величине барьерной емкости крем-



Ток и напряжение СБ  
при импульсном регулировании выходной мощности

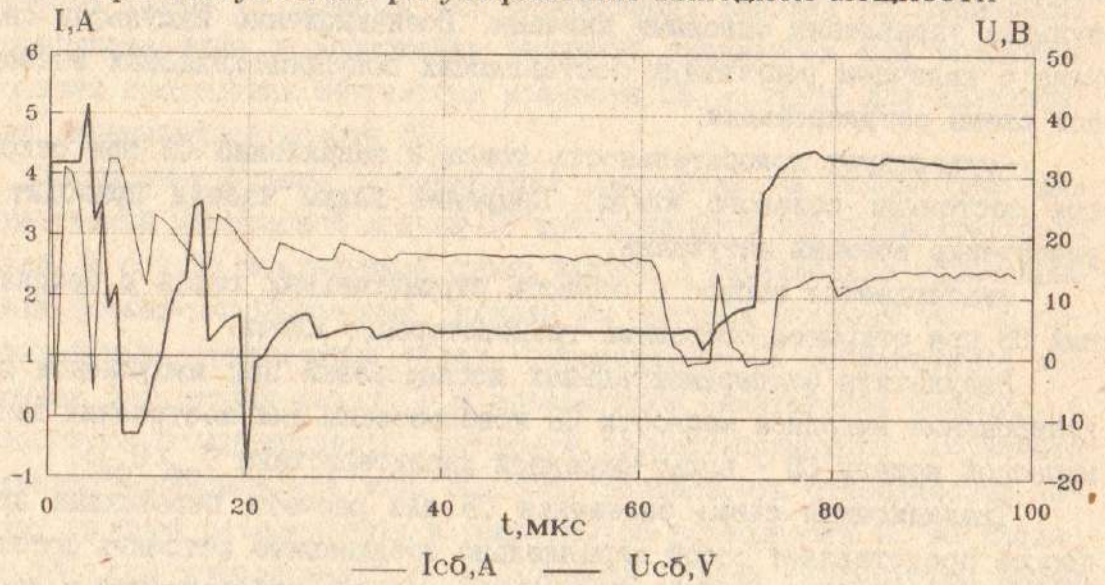


Рис. 1.

Зависимость удельной емкости единичного кремниевого ФЭП  
от температуры и напряжения

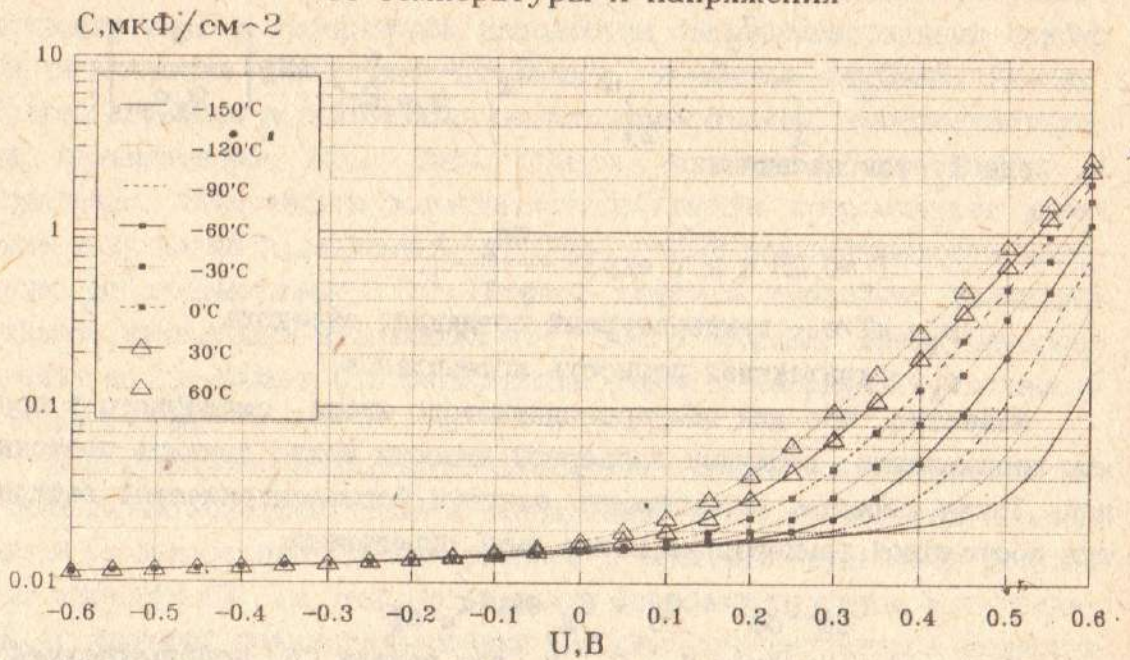


Рис. 2.



ниевое диода итоговая зависимость удельной емкости  $C_{уд}$ , мкФ/см<sup>2</sup> единичного кремниевого фотопреобразователя (ФП) от температуры и напряжения приобретает следующий вид:

$$C_{уд}(U, T) = \frac{0.015}{\sqrt{1-U/\varphi_z}} + \frac{9165}{T} \cdot \exp\left[\frac{U-\varphi_z}{T \cdot m_d}\right], \quad (94)$$

где  $\varphi_z = 0.8$ ,  $m_d = 2.56 \cdot 10^{-4}$ ,  $T$  - температура СБ.

На рис. 2 приведены зависимости нелинейной удельной емкости единичного кремниевого ФП от температуры и напряжения, диапазон изменения температуры при этом соответствует реальным условиям эксплуатации СБ космического применения. Приведенную зависимость достаточно просто настроить на характеристики конкретной СБ, используя в расчете величину площади СБ -  $S_{сб}$  и количество последовательно соединенных фотоэлементов -  $n_{nc}$ . Тогда:

$$C_{сб}(U_{сб}) = \frac{S_{сб} \cdot C_{уд}(U_{сб} / n_{nc})}{n_{nc}^2}$$

Результаты исследований, математическая модель для расчета переходных процессов при импульсном регулировании выходной мощности СБ предоставляют разработчику СЭС КА необходимую информацию для синтеза и анализа схемных решений. Анализируя полученные модельные зависимости можно отметить, что проектирование регуляторов выходной мощности СБ должно сопровождаться проверкой качества регулирования в достаточно широком диапазоне изменения динамических характеристик СБ.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей / Белан Н.В., Безручко К.В., Елисеев В.Б. и др.: В 2 т. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т., 1992. - 451с.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360с.
3. Васильев В.В., Заявлин В.Р., Летин В.А., Хотунцев Ю.П. Переходные процессы в цепях с фотопреобразователями. // Гелиотехника. - 1987. - N4. - С.3-6.
4. Slonim M.A., Tslaf A.L. Experimental investigation of transient phenomena in solar sell panels. // Proc. 16th Convention of IEEE in Israel, Tel-Aviv, 1989. -P.1-3.