УДК 621.311.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ИБС-300/25

Ю.А. Кремзуков

НИИ автоматики и электромеханики при ТУСУР, г. Томск Томский политехнический университет E-mail: Kremzukov@niiaem.tomsk.ru

Рассмотрен вариант построения имитатора солнечной батареи. Приведены структурная схема и вольтамперная характеристика имитатора. Произведено сравнение расчетной и экспериментальной зависимости полного выходного сопротивления (модуля комплексного сопротивления) от частоты.

Система электропитания (СЭП) является одной из важнейших систем космического аппарата (КА). В состав современной СЭП КА, как правило, входят солнечная и аккумуляторная батареи, комплекс автоматики и стабилизации в составе зарядно-разрядного модуля, стабилизатора напряжения, устройства контроля и автоматики. Для повышения надежности работы СЭП КА на орбите необходимо проводить наземные испытания, имитируя всевозможные режимы работы. Очевидно, что подключение реальных устройств - солнечных, аккумуляторных батарей, различной нагрузки при провелении испытаний СЭП – невозможно. Данная проблема решается выполнением специализированных, под конкретную СЭП КА, имитаторов солнечных и аккумуляторных батарей, а также нагрузочных устройств. Подключение реальной солнечной батареи (СБ) в наземных условиях невозможно из-за расхождения характеристик СБ, работающих в космосе и на земле. При наземных испытаниях используют так называемые имитаторы батарей солнечных (ИБС) [1-3].

ИБС предназначены для отработки на всех стадиях создания и испытания СЭП, в состав которых входят СБ, в том числе СЭП КА. Они должны удовлетворять ряду требований, часть которых зависит от варианта выполнения силовой схемы стабилизатора напряжения на шинах нагрузки КА.

В случае, если стабилизатор напряжения нагрузки выполнен на базе повышающего преобразователя, таким специфическим требованием является соответствие выходного импеданса ИБС импедансу реальной СБ, т. е. статическая и динамическая характеристики этих элементов должны максимально соответствовать друг другу [4, 5].

Принцип действия ИБС-300/25 основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети с помощью промежуточных звеньев повышенной частоты в энергию постоянного тока на выходе ИБС и параметрическом формировании его ВАХ с улучшенными динамическими характеристиками в зоне участка максимального отбора мощности.

ИБС обеспечивает формирование двух типов ВАХ, рис. 1:



Рис. 1. Типы ВАХ ИБС-300/25

- линейной, образованной в координатах (U_{Bux}, I_{Bux}) ломаной линией из токового участка и участка напряжения;
- нелинейной, с нелинейным сопряжением участков тока и напряжения.

Основные технические характеристики ИБС-300/25 приведены в таблице. Структурная схема ИБС представлена на рис. 2.

Питающая сеть через защитный автомат и фильтр радиопомех устройства ввода (УВ) поступает на входной выпрямитель (ВВх), выпрямленным напряжением 500 В которого запитаны три модуля конвертора (МК), представляющих собой трехфазный сдвоенный высокочастотный преобразователь, регулирование и стабилизация выходного напряжения которого осуществляется с помощью магнитного усилителя. Эквивалентная частота пульсаций на выходном блоке фильтра конвертора (БФК) равна 312,5 кГц.

С выхода БФК стабилизированное напряжение U_k , равное $U_k = U_{xx} + 20$ В, с ограничениями 255 В $\leq U_k \leq 320$ В питает три модуля стабилизатора тока (МСТ) I_{k3} , образующих широтно-модулированный трехфазный сдвоенный преобразователь понижающего типа. Эквивалентная частота пульсации тока,



Рис. 2. Структурная схема ИБС-300/25

как продукт работы модулей МСТ, в шине I_{K3} составляет 156,25 кГц. С целью увеличения фильтрации тока на выходе МСТ включены два силовых дросселя, расположенные в блоках дросселей (БДр1) и (БДр2).

Таблица. Основные технические характеристики ИБС-300/25

Параметр	Значение
Диапазон регулирования напряжения холостого хода, <i>U_{XX}</i>	20300 B
Дискретность регулирования напряжения холо- стого хода, <i>U_{xx}</i>	1 B
Диапазон регулирования тока короткого замыкания, <i>I_{кз}</i>	025 A
Дискретность регулирования тока короткого за- мыкания, <i>I</i> _{кз}	0,01 A
Диапазон регулирования наклона ВАХ на участке напряжения (<i>R_{II}=dU/dI</i>)	012,7 B/A
Дискретность регулирования наклона ВАХ на участке напряжения	0,1 B/A
Диапазон регулирования наклона ВАХ на участке тока (1/ <i>R_Ш=dI/dU</i>)	00,031 A/B
Дискретность регулирования наклона ВАХ на участке тока	0,001 A/B
Выходная мощность в нелинейном режиме в точке максимального отбора мощности	не менее 2600 Вт

Выход МСТ через устройство коммутации конденсаторов (УКК), развязывающий диод блока диодного (БД) и устройство коммутации (УК), подключен к нагрузке ИБС. Кроме этого к выходу МСТ через блок резисторов (БР) и блок фильтра (БФ) подключен блок нелинейного элемента (БЭН).

Независимо от сопротивления нагрузки R_{H} , которое может изменяться от нуля до бесконечности, выходной ток МСТ равен току I_{k3} , предустановленному из блока управления (БУ). Изменение тока нагрузки приводит только к параметрическому перераспределению токов между БЭН, шунтирующим резистором R_{III} и собственно нагрузкой. С целью снижения рассеиваемой мощности при формировании ВАХ ИБС и обеспечения возможности плавного регулирования напряжения холостого хода, последовательно с диодами БЭН включены конденсаторы фильтра БФ большой емкости. Стабилизацию и регулирование напряжения U_0 на них осуществляют зарядный (МЗ U_0) и разрядный (МР U_0) модули, реализующие адекватное реагирование при набросе и сбросе тока нагрузки соответственно. Величина этого напряжения адаптивно меняется в функции от текущих уставок ИБС.

$$U_{0} = U_{XX} \left(1 + \frac{R_{II}}{R_{III}} \right) - \Delta U_{H\mathcal{H}} - I_{K\mathcal{H}} \cdot R_{II} - U_{VD1},$$

где ΔU_{H9} – заданное падение напряжения на нелинейном элементе БЭН; U_{VD1} – падение напряжения на отсекающем диоде VD1 БД, включенном последовательно с R_{II} (\approx 0,9 В).

С целью исключения ошибки формирования ВАХ на интервале токов от 0 до $\left(I_{K3} - U_0 \frac{1}{R_{_{I\!I\!I}}} - \Delta I_{_{H\!2}}\right)$ па-

раллельно последовательному соединению БЭН и БФ через отсекающий диод включен блок фильтра нелинейного элемента (БФНЭ) большой емкости, стабилизацию и регулирование напряжения U_{0H3} которого осуществляют зарядный (МЗ U_{0H3}) и разрядный (МР U_{0H3}) модули, отрабатывающие наброс и сброс нагрузки ИБС соответственно. Кроме того, данная цепь обеспечивает безопасный режим работы диодов БЭН. Величина напряжения $U_{V2}\approx0,9$ В учитывает падение напряжения на отсекающем БФНЭ диоде.

$$U_{0H_{2}} = U_{0} + \Delta U_{H_{2}} - U_{VD_{2}}.$$

Конфигурация нелинейного сопротивления участков тока и напряжения ВАХ ИБС задается соответствующим последовательно-параллельным соединением диодов БЭН. При необходимости



Рис. 3. Схема для экспериментального измерения полного сопротивления ИБС-300/25

формирования ВАХ в виде ломаной линии диоды БЭН закорачиваются.

Таким образом, чем ближе сопротивление нагрузки ИБС к бесконечности, тем ближе сумма токов БЭН и R_{III} к I_{K3} , и тем большая часть энергии возвращается в БФК с помощью МР U_{0H3} и МР U_0 .

Для устойчивой работы MPU_0 и MPU_{0H9} требуется задание начального тока подмагничивания соответствующих магнитных усилителей, что естественно приводит к протеканию соответствующих начальных рабочих токов разряда. С целью компенсации этих токов между БФК и БФ (БФНЭ) введены соответственно зарядные модули $M3U_0$ и $M3U_{0H9}$, токи которых выбраны с небольшим превышением по отношению к соответствующим начальным разрядным токам.

Для снятия экспериментальной зависимости полного выходного сопротивления от частоты использован метод вольтметра — амперметра. Этот метод является косвенным, т. к. сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым объектом и последующим расчетом его параметров по закону Ома. На рис. 3 приведена схема для экспериментального измерения полного сопротивления ИБС-300/25.

В зависимости от выбранной рабочей точки в статическом режиме ИБС работает на одном из трех участков ВАХ (тока, напряжения, нелинейного переходного). Каждый участок описывается своей статической характеристикой и имеет эквивалентную схему для переменного тока.

Статическая характеристика ИБС участка тока описывается уравнением

$$U_{HI} = R_{III} (I_{K3} - I_{H}) - U_{(VDB_{blx})} - I_{H} R_{JVDB_{blx}},$$

где U_{HI} — напряжение на нагрузке ИБС на участке тока; I_H — ток нагрузки ИБС; U_{0VDBax} — падение напряжения на выходном диоде; R_{JVDBax} — дифференциальное сопротивление выходного диода, определяемое по касательной к ВАХ диода в точке с координатой I_H . На рис. 4 представлена эквивалентная схема участка тока для переменного тока.



Рис. 4. Эквивалентная схема участка тока для переменного тока

Комплексное сопротивление *Z_i* выхода ИБС на участке тока равно

$$Z_{i} = R_{\text{LVDBbax}} + \frac{R_{\text{III}} X_{\text{CBbax}}}{R_{\text{III}} + X_{\text{CBbax}}},$$

где $X_{CB_{blx}} = \frac{1}{j\omega C_{_{bblx}}}$ – емкостное сопротивление

 C_{Bax} на круговой частоте $\omega = 2\pi f$ переменной составляющей тока нагрузки ИБС; C_{Bax} – емкость выходного фильтра ИБС, выбранная в диапазоне от 0,39 до 3,47 мкФ.

Модуль комплексного сопротивления равен

$$z = |Z| = \frac{u}{i} = \sqrt{R_z^2 + X_z^2}.$$

На рис. 5 приведены зависимости полного выходного сопротивления (модуля комплексного сопротивления) z_{Bax} ИБС на участке тока при U_{XX} =50 В; I_{K3} =5 А; ΔU_{H3} =10 В; ΔI_{H3} =2,1 А; R_{II} =5 Ом; $1/R_{III}$ =0,025 А/В; C_{Bax} =0,39 мкФ.

Статическая характеристика ИБС участка нелинейного элемента описывается выражением

$$U_{HH3} = \frac{(I_{K3} - I_H)R_{II} + U_0 + U_{H3} + U_{VD1}}{1 + \frac{R_{II}}{R_{III}}},$$

где U_0 – расчетная величина напряжения конденсатора фильтра C_0 ; $U_{H9} = F(i_{H9})$ – координата ВАХ заданного нелинейного элемента, соответствующая координатам расчетной точки ВАХ ИБС.



Рис. 5. Зависимости полного выходного сопротивления ИБС-300/25 на токовом участке: 1) расчетная; 2) экспериментальная





Рис. 6. Эквивалентная схема нелинейного участка для переменного тока

Комплексное сопротивление *Z*_{*H*³} выхода ИБС на нелинейном участке определяется выражением

$$\frac{1}{Z_{H\mathcal{I}}} = \frac{1}{R_{III}} - \frac{1}{X_{C_{BbIX}}} + \frac{1}{R_{\mathcal{I}VDBbIX}} + R_{\mathcal{I}I} + R_{\mathcal{I}H\mathcal{I}},$$

где *R*_{днэ} – дифференциальное сопротивление нелинейного элемента.

На рис. 7 представлены зависимости полного выходного сопротивления z_{Bbax} ИБС на нелинейном участке при U_{XX} =50 В; I_{K3} =5 А; ΔU_{H9} =26 В; ΔI_{H9} =4,2 А; R_{II} =1 Ом; $1/R_{III}$ =0,017 А/В; C_{Bbax} =0,39 мкФ.

Статическая характеристика участка напряжения описывается выражением

$$U_{HU} = \frac{(I_{K3} - I_{H})R_{II} + U_{0} + \Delta U_{H3 \; aa} + U_{VD1}}{1 + \frac{R_{II}}{R_{III}}},$$

где $\Delta U_{H_{3,ad}}$ — заданное значение падения напряжения на нелинейном элементе.

На рис. 8 представлена эквивалентная схема участка напряжения ВАХ ИБС для переменного тока.



Рис. 7. Зависимости полного выходного сопротивления ИБС-300/25 на нелинейном участке: 1) расчетная; 2) экспериментальная



Рис. 8. Эквивалентная схема участка напряжения для переменного тока

Комплексное сопротивление *Z*^{*U*} выхода ИБС на участке напряжения можно найти из уравнения

$$\frac{1}{Z_{U}} = \frac{1}{R_{III}} - \frac{1}{X_{C_{GbXX}}} + \frac{1}{R_{JVD \ 1} + R_{II} + R_{JVD \ 2}}$$

На рис. 9 представлены зависимости полного выходного сопротивления z_{Bec} ИБС на участке напряжения при U_{XX} =50 В; I_{K3} =3 А; ΔU_{H9} =6 В; ΔI_{H9} =2,1 А; $1/R_{III}$ =0,025 А/В; R_{II} =12,7 Ом, C_{Bec} =0,39 мкФ.



Рис. 9. Зависимости полного выходного сопротивления ИБС-300/25 на участке напряжения: 1) расчетная; 2) экспериментальная

Несовпадение экспериментальных и теоретических результатов в области высоких частот вызвано паразитными параметрами силового монтажа. Исследования, проведенные НПО ПМ (г. Железногорск) совместно с НИИ АЭМ (г. Томск), показали, что для обеспечения наземных электрических испытаний необходим широкополосный ИБС нового поколения — на параметрическом принципе, что позволяет обеспечить формирование статических и динамических характеристик ИБС, близких к реальным характеристикам СБ.

Структурная схема силовой части ИБС практически полностью совпадает с эквивалентной схемой реальной СБ, чем обеспечивается тождественность испытаний с помощью ИБС СЭП КА реальным условиям работы СЭП от СБ в составе КА.

ИБС-300/25 позволяет с помощью ПЭВМ, используя специализированное программное обеспе-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. – Новосибирск: Наука, 1994. – 318 с.
- Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 327 с.
- Гордеев К.Г., Шиняков Ю.А., Чернышев А.И., Эльман В.О. Критерии выбора схемы стабилизации напряжения солнечных батарей для системы электроснабжения космического аппарата // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. под ред. В.Н. Гладущенко. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 43–48.

чение, задавать программу испытаний с непрерывным ведением протокола результатов испытания.

ИБС, реализованный с использованием источников напряжения с безынерционным ограничением тока, имеет следующие преимущества:

- идеальная частотная характеристика, т. е. совпадение статической и динамической ВАХ ИБС и СБ;
- простота регулирования характеристик ВАХ ИБС с запасом, перекрывающим область реального изменения ВАХ СБ вследствие технологического разброса, деградации батарей на орбите, выхода из строя их отдельных модулей;
- возможность проведения полных наземных испытаний СЭП КА как в штатных, так и в аварийных ситуациях.
- Поляков С.А. Выбор режима работы солнечных батарей // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. под ред. В.Н. Гладущенко. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 49–58.
- Амельченко А.Н. Устройство для исследования статических и динамических характеристик солнечных батарей // Сб. тез. докл. Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов СибГАУ. – Красноярск, 2006. – С. 122–123.

Поступила 25.03.2008 г.

УДК 621.396.6+621.792

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г.В. Кузнецов*, Г.Я. Мамонтов, А.В. Титов

*Томский политехнический университет Томский государственный архитектурно-строительный университет E-mail: avtitov@sibmail.com

Проведено численное моделирование нестационарного двумерного температурного поля токоведущей дорожки полупроводникового прибора для двух случаев работы типичного силового транзистора: в условиях окисления проводника кислородом воздуха, и без протекания процесса окисления металла. Сопоставлены интенсивности отказов транзистора для этих двух случаев. Показано, что изменение интенсивности отказов в условиях окисления составляет не менее 50 %. Установлено, что при оценке показателей надежности приборов необходимо проводить анализ с учетом процесса окисления металла.

Введение

Обрыв металлизации является одним из основных источников сбоев в работе интегральных схем и транзисторов и составляет более 50 % всех отказов [1]. Причиной обрыва является электрохимическая коррозия проводника. Наиболее часто выходят из строя полупроводниковые приборы (ППП) изготовленные в металлопластиковом корпусе, т. к. фактически пластмассовые корпуса не защищают приборы от проникновения влаги и воздуха при длительной эксплуатации [1]. Типичные полимерные материалы типа полиэтилена, использующиеся для изоляции ППП, при длительной эксплуатации в условиях циклических и механических нагрузок растрескиваются [2].

В результате длительного воздействия температурных и электрических нагрузок процессы коррозии металлизации в ППП, как и любые деградационные процессы ускоряются.

Силовые элементы являются самыми уязвимыми по показателям долговечности любого устрой-