

УДК 621.314

А.Г. Юдинцев

Энергопреобразующие комплексы для наземной отработки и подтверждения прогнозируемой надёжности систем электропитания космических аппаратов

Проведен обзор существующих систем электропитания космических аппаратов за последние 20 лет, используя данные передовых отечественных предприятий ракетно-космической отрасли. Сформулированы основные требования, предъявляемые к современным энергопреобразующим испытательным комплексам. Классифицированы этапы наземной отработки систем электропитания и виды контрольно-проверочной аппаратуры. Рассмотрены структурные схемы систем электропитания космических аппаратов, нашедших наибольшее применение. Приведены возможные варианты структурной реализации силовых энергопреобразующих комплексов – автоматизированной испытательной системы, имитаторов элементов систем электропитания космических аппаратов, проанализированы их основные достоинства и недостатки.

Ключевые слова: система электропитания космического аппарата, энергопреобразующая аппаратура, наземные испытания, контрольно-проверочная аппаратура, прогнозируемая надёжность, имитатор аккумуляторной батареи, имитатор солнечной батареи, имитатор нагрузки.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-95-102

Одной из важнейших подсистем, образующих платформу космического аппарата (КА), и во многом определяющих срок его активного существования, является система электропитания (СЭП). Очевидно, что при отсутствии напряжения на общей обеспечивающей шине питания неработоспособными окажутся системы ориентации и терморегулирования, бортовой блок управления перестанет отвечать на команды телеметрии, в итоге – аппарат будет потерян [1].

Как правило, в состав СЭП КА входит следующее бортовое оборудование:

- солнечная батарея (СБ, БС);
- аккумуляторная батарея (АБ);
- энергопреобразующая аппаратура (ЭПА);
- вся бортовая нагрузка – служебная и полезная.

ЭПА является системообразующим элементом СЭП КА и предназначена для обеспечения совместной работы источника (БС) и накопителя (АБ) электрической энергии как по внешним командам управления, так и собственными аппаратными средствами ЭПА с целью электропитания бортовой аппаратуры (БА) КА электроэнергией заданного качества. Основным количественным показателем, отражающим техническое совершенство ЭПА при выполнении целевых функций, является удельная мощность (Вт/кг).

СЭП как составная часть изделия вносит особый вклад в прогнозируемую надёжность КА. Статистика отказов показывает, что, несмотря на многолетний опыт, необходимым является увеличение надёжности СЭП КА. Следует отметить, что большая часть отказов выявляется и устраняется до запуска КА [2–4]. К авариям приводят, как правило, не выявленные до полета причины отказов. Показатели надёжности рассчитываются еще на этапе проектирования, но особым этапом в создании СЭП КА и подтверждении её надёжности являются наземные испытания.

Современное состояние СЭП КА

Анализируя технические данные КА, выпускаемых передовыми отечественными предприятиями в большом объёме, можно сделать вывод, что за все время их разработки и производства непрерывно происходит рост потребляемой мощности бортовой аппаратурой, как следствие – рост мощности СЭП, а также срока активного существования (САС) аппарата [5, 6]. Так, за последние 10–15 лет мощность СЭП КА в среднем увеличилась с 6–7 до 15–25 кВт, САС – до 15 лет (таблица). Кроме того, осуществлено разделение СБ и силовых модулей ЭПА на секции, разработана бортовая аппаратура негерметичного исполнения, никель-водородные АБ заменены на литий-ионные, напряжение на общей обеспечивающей шине прошло эволюцию от 27 до 100 В. При этом число самих КА, работающих на земных орбитах, с каждым годом неуклонно растёт.

Согласно Положению о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов РК-11-КТ, необходимо проводить этап наземной отработки бортовых систем КА, в том числе и СЭП. Испытания с применением бортовых СБ, АБ и всего комплекса нагрузок КА, при длительном прохождении полного диапазона в различных режимах работы СЭП, в наземных условиях не представляются возможными в силу очевидных причин. С учетом этого целесообразно в ходе испытаний заменять элементы СЭП КА их физическими моделями, адекватно отражающими электротехнические свойства элементов СЭП – вольт-амперные и частотные характеристики, внутреннее сопротивление, выходные динамические параметры.

Наземная отработка СЭП КА

С целью проведения комплексных наземных испытаний и подтверждения прогнозируемой надёжности СЭП КА на отечественных предприятиях используется контрольно-проверочная аппаратура

(КПА). Современная КПА – это большой класс устройств, в состав которого входит различное электрооборудование:

- вибростенды;
- системы термостатирования ЭПА;
- оборудование для измерения динамических характеристик СБ;
- температурная и термовакуумная камеры для проведения работ с АБ;
- современная измерительная техника для регистрации характеристик СЭП;
- системы автоматического сбора и обработки информации;
- системы гарантированного электропитания.

Но особое место в составе КПА занимают силовые энергопреобразующие комплексы – имитаторы элементов (ИЭ) СЭП КА и зарядно-разрядные программно-аппаратные комплексы (ЗР ПАК) для наземного обслуживания бортовых АБ.

Мощность СЭП КА

Тип КА	Мощность СЭП, Вт	САС, лет	Начало летных испытаний	Масса, кг
Экспресс-А	2540	7	12.03.2000	2600
SESAT	5300	10	18.04.2000	2600
Молния-ЗК	1470	5	20.07.2001	1740
Глонасс-М	1400	7	10.12.2003	1415
Экспресс-АМ	6300	12	29.12.2003	2600
Экспресс-АМ33	6770	12	28.01.2008	2579
Экспресс-АМ44	6770	12	11.02.2009	2532
Луч-5А	2200	10	11.12.2011	1140
AMOS-5	7600	15	11.12.2011	1972
Ямал-300К	7600	14	03.11.2012	1870
Луч-5Б	2200	10	03.11.2012	1350
Spacebus-4000 C2	8000	15	2011–2012	4850
Spacebus-4000 C3	10000	15	2011–2012	5300
Spacebus-4000 C4	12000	15	2011–2012	5900
SSL/1300	5–25	>15	2013	3700–6400
КАZSAT-3	9320	15	28.04.2014	1740
Экспресс-АМ5	16200	15	21.10.2014	3360
Экспресс-АМ6	16200	15	21.10.2014	3360
Экспресс-АМ8	5880	15	14.09.2015	2100
Ямал-401	16800	14	14.12.2015	2976

Являясь физическими моделями реальных объектов, ИЭ СЭП должны обладать максимально близкими к бортовым характеристиками солнечной и аккумуляторной батареей, а также обеспечивать имитацию статических и динамических токовых нагрузок для отработки профиля мощности, потребляемой бортовой аппаратурой. ЗР ПАК необходимы для проведения контрольных циклов заряда и разряда бортовых (полётных) АБ, их диагностики и предстартового обслуживания на космодроме. В некоторых случаях (определяется заказчиком), предстартовое энергообеспечение СЭП КА может осуществляться имитаторами солнечных, либо аккумуляторных батарей.

Таким образом, энергопреобразующие комплексы, применяемые в ходе наземных испытаний,

должны отвечать ряду требований, самыми важными из которых, как и для самой СЭП КА, также являются энергетическая эффективность, надёжность, оптимальные массогабаритные показатели, точность и длительные сроки безотказной эксплуатации.

Отказы энергопреобразующих комплексов, спроектированных и изготовленных с невыявленными дефектами, при проведении этапов наземной отработки приводят к нежелательным последствиям: создаются аварийные ситуации для ЭПА, АБ либо всего космического аппарата, длительное выяснение причин остановки испытаний, дорогостоящие простои производства и т.д.

В настоящее время отечественными предприятиями ракетно-космической отрасли имитаторы элементов СЭП КА, как правило, комплектуются для следующих типов рабочих мест:

- рабочее место проведения наземной экспериментальной отработки и приемосдаточных испытаний (ПСИ) ЭПА;
- во время лабораторно-отрабочных испытаний (ЛОИ) СЭП;
- для электроиспытаний всего КА в цеховых условиях;
- с целью предстартового энергообеспечения КА, находящихся в капсуле обтекателя ракеты-носителя.

Как отмечалось выше, средняя мощность СЭП КА постоянно увеличивается, поэтому необходимым является увеличение мощности и эффективности силовых энергопреобразующих комплексов. В связи с этим необходимы не только разработка и производство, а также развитие методов и современных подходов к проектированию эффективных энергопреобразующих комплексов для испытаний СЭП КА и АБ. Сегодня существуют различные реализации ИЭ СЭП КА и ЗР ПАК для проведения наземных испытаний, разработанные предприятиями отечественной и зарубежной промышленности. Но их эффективность, точность, показатели надёжности, массогабаритные параметры, гарантийные сроки эксплуатации ставят перед разработчиками ряд задач по проектированию и созданию более эффективных силовых энергопреобразующих комплексов [7–10].

Структурные схемы СЭП КА

За всю историю проектирования и производства космических аппаратов к настоящему времени были разработаны различные структуры СЭП, подходящие под определенные типы задач, рабочие орбиты и массогабаритные параметры спутников. Но из структур, нашедших устойчивое применение, можно выделить следующие (рис. 1): параллельная с шунтовым стабилизатором (*a*), параллельно-последовательные (*b*, *в*) и с экстремальным регулятором мощности (*г*) [11–13].

При этом все существующие структуры СЭП КА обобщенно можно представить в виде Т-образной модели баланса мощностей, состоящей из генерирующего (солнечная батарея – СБ), накапливающего (аккумуляторная батарея – АБ) и потребляющего

шего (обобщённая нагрузка – Н) элементов, объединённых посредством блока ЭПА (рис. 2).

Представленная модель отображает четыре возможных режима передачи мощности через преобразователи ЭПА:

- 1) АБ не задействована, нагрузка питается только от СБ: $P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1}$;
- 2) АБ заряжается избытком мощности СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1} - P_{СБ2} \cdot \eta_{ЭПА2};$$

- 3) режим пиковой нагрузки – АБ компенсирует недостаток мощности СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1} + P_{АБ} \cdot \eta_{ЭПА3};$$

- 4) теневой участок орбиты – нагрузка обеспечивается за счёт мощности, передаваемой только от АБ: $P_H = P_{АБ} \cdot \eta_{ЭПА3}$; где $\eta_{ЭПА1} - \eta_{ЭПА3}$, КПД каналов преобразования ЭПА СЭП КА.

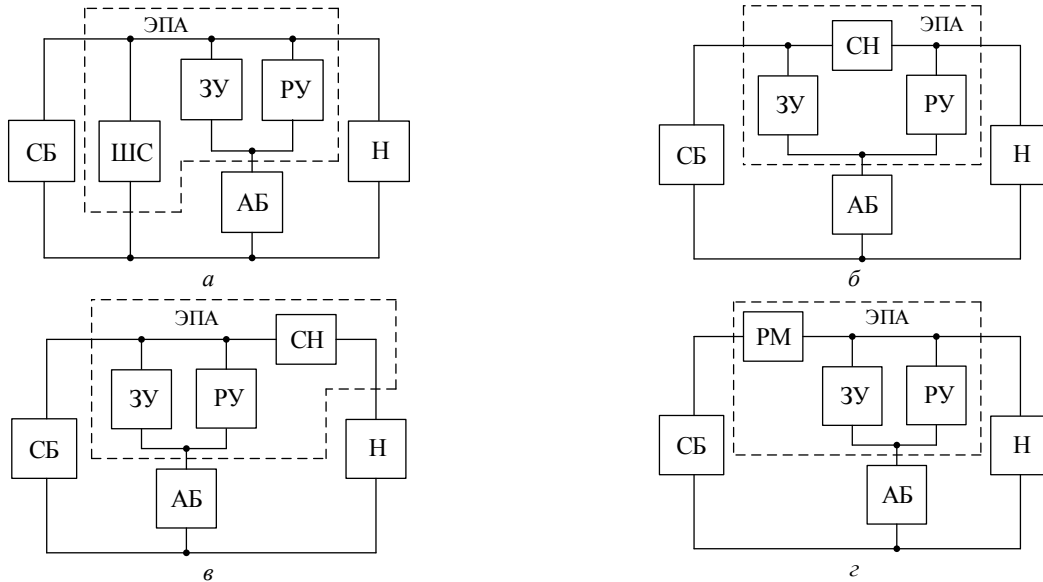


Рис. 1. Структурные схемы СЭП КА

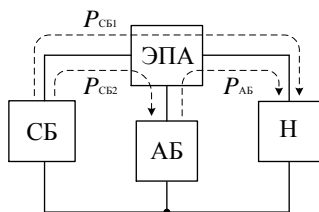


Рис. 2. Т-образная модель баланса мощностей СЭП КА

Блок ЭПА обладает рядом основополагающих функций и в зависимости от структуры СЭП, содержит стабилизатор напряжения, шунтовой стабилизатор, зарядно-разрядные устройства АБ, а также устройство обмена информацией с бортовой ЭВМ. Таким образом, блок ЭПА является системообразующим элементом, который обеспечивает алгоритм работы СЭП КА и является важнейшим элементом, определяющим надёжность функционирования космического аппарата в целом.

Автоматизированная испытательная система

В зависимости от типа рабочего места и соответствующего ему вида испытаний (ПСИ ЭПА, ЛОИ СЭП, электроиспытания КА) имитаторы элементов СЭП могут применяться как по отдельности, так и в составе испытательной системы. Для проведения комплексной наземной отработки ЭПА СЭП КА создается интегрированная испытательная площадка – автоматизированная испытательная система (АИС) (рис. 3) [14, 15]. АИС яв-

ляется физической реализацией Т-образной модели баланса мощностей и состоит из силовых энергопреобразующих комплексов – ИЭ СЭП КА, питающихся от промышленной 3-фазной сети, управляющей ЭВМ и автоматизированной системы контроля, имитирующей формирование команд управления и обработки телеметрии, поступающей от блока ЭПА, а также необходимой для проведения проверок кабельной сети и сопротивления изоляции [16].

Структура АИС в общем виде остается постоянной, изменяются количество и типы имитаторов АБ и СБ, которые определяются мощностью и структурой СЭП, при этом функционал комплекса имитации нагрузки может расширяться дополнительными блоками формирования динамических нагрузочных режимов и гармонических токов.

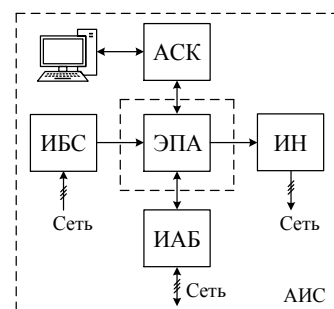


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной испытательной системы с имитаторами элементов СЭП КА и автоматизированной системой контроля

Основной вклад в эффективность испытательной системы в целом вносят имитаторы элементов СЭП, приведенные на рис. 3. Поэтому разработка и исследование структур ИЭ, их оптимизация, увеличение энергетических показателей, моделирование, определение общих подходов к проектированию и решению частных задач, являющихся свойством отдельной физической модели элемента СЭП, представляют особый интерес.

Имитатор аккумуляторной батареи

Любой из энергопреобразующих комплексов, применяемых при испытаниях СЭП, можно представить в виде функционального блока, на вход которого подается 3-фазное напряжение промышленной сети, при этом на выходе обеспечивается ВАХ, импеданс и динамические режимы работы элемента СЭП (рис. 4). Идеальная физическая модель, представленная в виде «чёрного ящика», абсолютно адекватна реальному элементу СЭП, обладает точностью выходных параметров, КПД, близким к 1, имеет низкие массогабаритные показатели. Но адекватность имитационно-физических моделей, реализуемых на практике, как правило, далека от идеальной. Это связано со свойствами структурных схем, с потерями в силовых преобразовательных модулях, а также с недостатками систем управления.

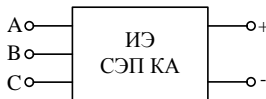


Рис. 4. Имитатор элемента СЭП КА в виде модели «чёрного ящика»

Рассмотрим возможные варианты структурной реализации ИЭ СЭП КА, раскрывая блок чёрного ящика, представленный на рис. 4. Например, один из вариантов структурной схемы имитатора аккумуляторной батареи (ИАБ) – энергопреобразующего комплекса, представленного на рис. 5, содержит два силовых преобразовательных канала – разряд и заряд АБ.

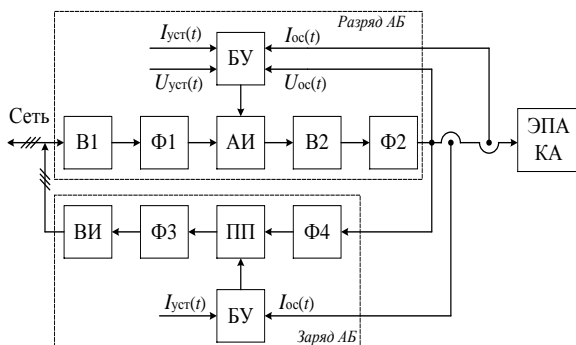


Рис. 5. Структурная схема имитатора АБ

Канал «Разряд АБ» содержит низкочастотный мостовой выпрямитель В1, НЧ-фильтр Ф1, автономный инвертор (АИ), высокочастотный выпрямитель В2, ВЧ-фильтр Ф2. Канал «Заряд АБ» состоит из ведомого инвертора (ВИ), НЧ-фильтра

Ф3, повышающего преобразователя (ПП) и ВЧ-фильтра Ф4. Силовые преобразователи каналов АИ и ПП управляются блоком управления (БУ), на который подаются сигналы уставок от задающего устройства и сигналы обратной связи по входному/выходному току и напряжению выхода ИАБ. При этом одним из основных требований в технических заданиях на разработку и изготовление любого ИЭ СЭП является наличие гальванической развязки между выходом ИЭ и питающей 3-фазной сетью. Очевидно, это возможно обеспечить только с помощью силового трансформатора. Вариант установки последнего в низкочастотную часть схемы, на входе силовой сети в ИЭ, сегодня не имеет смысла для рассмотрения, так как при вышеуказанных мощностях СЭП массогабаритные и экономические показатели такого трансформатора не выдерживают никакой критики. Помимо этого, современная элементная база позволяет преобразовывать данный диапазон мощностей на достаточно высоких частотах (100–400 кГц). Поэтому трансформатор, осуществляющий гальваническую развязку и согласование уровней напряжения, размещают в цепях блоков АИ и ПП, при этом, как известно [13], значительно снижаются его массогабариты.

Основная проблема и цель при создании ИЭ СЭП КА – это адекватность реальному физическому элементу СЭП. В случае с ИАБ основными параметрами, отражающими степень адекватности, являются: ширина диапазона имитируемого выходного напряжения (3–200 В), пульсации напряжения на выходе имитатора (не более 100 мВ), импеданс каналов заряд/разряд (не более 1 Ом), скорость реакции системы на внешнее возмущение (не более 1–2 мс), КПД (не менее 0,9), уровень электромагнитных излучений, соответствующий ГОСТ Р 54148–2010. Для решения этой проблемы необходимо всестороннее исследование структуры ИЭ СЭП – представление и последующий анализ ИЭ как системы автоматического управления, имитационное моделирование, анализ работы силовых преобразовательных модулей в составе имитатора.

Имитатор эквивалентной нагрузки

Обобщенная функциональная схема имитатора эквивалентной нагрузки (ИЭН) СЭП представлена на рис. 6. Основная задача данного энергопреобразующего комплекса – формирование статических и динамических режимов нагрузочных токов в выходной шине ЭПА СЭП КА. Динамические режимы воспроизводит блок формирования нелинейных нагрузок (БФНН), в него, как правило, входят формирователи гармонических токов широкого спектра частот, формирователи фронтов тока, имитаторы подключения ёмкостной нагрузки и т.д. Режим формирования статических (постоянных) токов осуществляет силовой преобразовательный канал, содержащий ВЧ-фильтр Ф1, НЧ-фильтр Ф2, повышающий преобразователь ПП и

ведомый инвертор ВИ. Стабилизацию входного тока имитатора нагрузок обеспечивает блок управления, на который подаются сигналы обратной связи $I_{oc}(t)$ и от задающего устройства $I_{уст}(t)$.

При этом следует отметить, что силовые преобразовательные каналы – канал заряда в ИАБ, канал разряда в ЗР ПАК и канал формирования статических нагрузок в ИЭН могут быть идентичны по своей структуре.

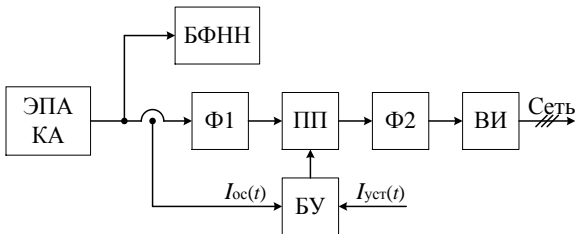


Рис. 6. Структурная схема имитатора эквивалентной нагрузки СЭП КА

В каждом случае энергия, потребляемая от ЭПА СЭП КА либо от бортовой АБ, не рассеивается в окружающее пространство (за исключением собственных потерь), а передается в питающую 3-фазную сеть. Преимущества такого способа формирования потребляемых токов очевидны. Несмотря на это, сегодня существуют нагрузочные комплексы, преобразующие электрическую энергию полностью в тепловую [17, 18].

Имитатор солнечной батареи

Принцип действия имитатора СБ основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети с помощью промежуточных звеньев повышенной частоты, в энергию постоянного тока на выходе ИБС и формировании ВАХ, соответствующей схеме замещения преобразователя солнечной энергии в электрическую (рис. 7, 8) [19]. При этом ИБС должен обладать динамическими характеристиками, обеспечивать формирование линейных и нелинейного участков ВАХ, а также необходима имитация эквивалентной ёмкости бортовой СБ [20–22].

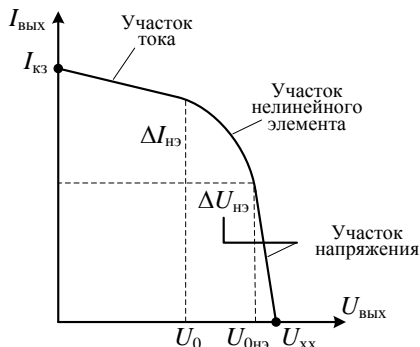


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика имитатора солнечной батареи

Имитаторы солнечных батарей могут быть как одноканальными, так и многоканальными в случае имитации многосекционных солнечных батарей спутника.

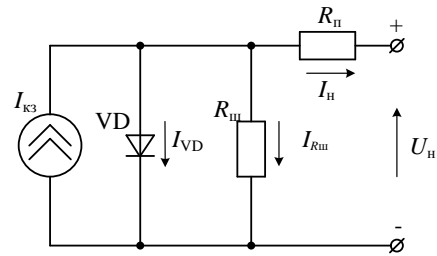


Рис. 8. Схема замещения элемента солнечной батареи

Одна из используемых при проектировании структурных схем энергопреобразующего комплекса – имитатора солнечной батареи КА представлена на рис. 9.

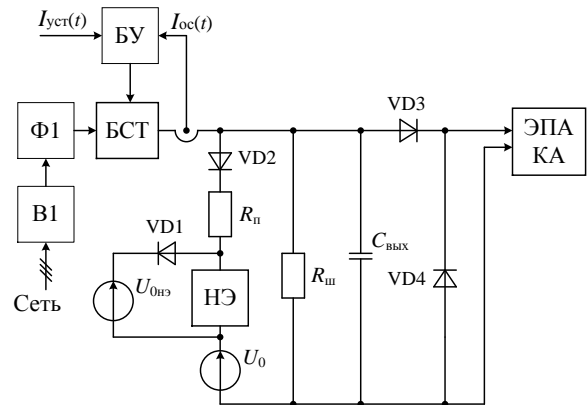


Рис. 9. Структурная схема имитатора солнечной батареи

Аналогично предыдущим структурам ИЭ в данном случае сеть поступает на мостовой выпрямитель В1, затем сглаживается НЧ-фильтром Ф1. Сглаженное напряжение подается на блок стабилизации тока (БСТ), основная задача которого – имитация тока короткого замыкания $I_{кз}$ солнечной батареи. Ток с выхода БСТ поступает в нагрузку, в цепь шунтового сопротивления $R_{ш}$ и в цепь с нелинейным элементом (НЭ), состоящим из диодно-резистивных матриц. Наклон ВАХ на участке напряжения (см. рис. 7) определяется величиной сопротивления $R_{п}$, наклон ВАХ на участке тока – величиной сопротивления $R_{ш}$. Форма ВАХ на нелинейном участке задается блоком НЭ. Последовательно с НЭ включен источник напряжения U_0 , который определяет напряжение холостого хода ИБС. С целью снижения тепловых потерь в блоке НЭ, особенно в режиме холостого хода, в схему включают источник напряжения $U_{0нэ}$. С помощью блока $C_{вых}$ имитируется выходная ёмкость солнечной батареи. Диоды VD1–VD3 выполняют отсекающую функцию, исключая взаимовлияние источников энергии друг на друга, диод VD4 выполняет защитную функцию выхода имитатора.

К основному достоинству данной структуры следует отнести относительную безынерционность, т.е. способность системы в течение не более 1 мс реагировать на внешнее воздействие со стороны ЭПА СЭП КА. Одним из основных недостатков данного энергопреобразующего комплекса

является низкая энергоэффективность, так как участки цепей, формирующие ВАХ ИБС, такие как $R_{ш}$, $R_{п}$, блок НЭ, рассеивают значительную мощность, требуют постоянного контроля температуры и, в случае необходимости, включения системы активного охлаждения.

Представленные структурные схемы энергопреобразующих комплексов не являются единственно возможными и приведены в качестве примеров, иллюстрирующих сложность решаемых задач.

Заключение

1. С целью подтверждения прогнозируемой надёжности космического аппарата необходимо проведение комплексной наземной отработки его системы электропитания.

2. Мощность БА и как следствие мощность СЭП КА постоянно растут. Согласно обработанным данным за последние 10–15 лет, мощность СЭП КА в среднем увеличилась с (6–7) до (15–25) кВт.

3. За последние 20 лет СЭП и КА претерпели изменения: при проектировании СЭП в основном применяются структуры – параллельная с шунтовым стабилизатором, параллельно-последовательные и с экстремальным регулятором мощности, ввиду большей энергетической эффективности и надёжности; с целью увеличения объёма полезной нагрузки выполняется внегермоконтейнерное конструирование КА; никель-водородные АБ заменены на более энергоёмкие литий-ионные; напряжение общей обеспечивающей шины увеличено с 27 до 100 В с целью уменьшения веса бортовой кабельной сети при возросших мощностях потребления.

4. Сегодня используются различные структурные реализации энергопреобразующих комплексов, но учитывая то, что на фоне роста средней мощности СЭП с каждым годом растёт и количество самих КА, функционирующих в околоземном пространстве, существует острая необходимость в увеличении энергоэффективности ЭК и как следствие их надёжности для увеличения качества наземной отработки и предстартового обслуживания СЭП КА.

5. Энергопреобразующие комплексы для наземной отработки СЭП КА являются сложными нелинейными системами. Для увеличения их энергоэффективности и надёжности необходимо проведение всесторонних исследований: построение имитационных и математических моделей, поиск способов снижения теплонагруженности элементов силовых преобразовательных модулей, анализ способов увеличения адекватности ЭК, имитирующих нелинейные ВАХ.

Литература

1. ТАСС. Ангольский телекоммуникационный спутник «Ангосат-1». Досье: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/4847125> (дата обращения: 27.01.2019).

2. Куренков В.И. Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники: электронный курс лекций / В.И. Куренков, В.В. Волоцув. – Самара: Самар. гос. аэрокосмический ун-т, 2010. – 55 с.

3. Матвеевский В.Р. Надёжность технических систем: учеб. пособие. – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2002. – 113 с.

4. Жаднов В.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных и радиоэлектронных средств / В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с.

5. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва. Космические аппараты АО «ИСС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft> (дата обращения: 02.02.2019).

6. Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина. Проекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.laspace.ru/projects> (дата обращения: 02.02.2019).

7. Пат. 2635897 Российская Федерация, МПК51 G 06 G 7/48. Электрический имитатор аккумуляторной батареи с защитой по току и напряжению и устройство защиты электрического имитатора аккумуляторной батареи / Е.А. Мизрах, Д.К. Лобанов, Д.Н. Пойманов, Р.В. Балакирев, Е.А. Копылов, Н.В. Штабель; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва». – №2016148982; заявл. 13.12.16; опубл. 16.11.17. Бюл. № 32.

8. Пат. 2349518 Российская Федерация, МПК51 В 64 G 7/00. Стенд для моделирования системы электропитания космического аппарата / В.И. Пушкин, А.С. Гуртов, С.И. Миненко, В.Н. Фомакин, Ю.Д. Петренко; заявитель и патентообладатель ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». – №2007126588/11; заявл. 12.07.07; опубл. 20.03.09. Бюл. № 8.

9. Холдинг «Информтест». Продукция, Системы функционального контроля: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.informtest.ru/produksiya/functional-control-systems> (дата обращения: 05.02.2019).

10. Keysight Technologies. Решения для моделирования спутниковых энергосистем: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru> (дата обращения: 05.02.2019).

11. Системы спутников связи: учеб. пособие по курсу «Системы электроснабжения летательных аппаратов» для студентов приборостроительного факультета. КИКТ» / А.Б. Базилевский, А.Г. Козлов, М.В. Лукьяненко, В.Г. Шелудько. – Красноярск, 1989. – 224 с.

12. Куландин А.А. Энергетические системы космических аппаратов / А.А. Куландин, С.В. Тимашев, И.В. Зайцев. – М.: Наука, 1994. – 283 с.

13. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.

14. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.А. Пчельников, В.М. Рулевский, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 35–39.

15. Брорин Эд. Варианты решения источник-приемник тока для тестирования системы электропитания спутника // Силовая электроника. – 2014. – № 4. – С. 68–70.

16. Автоматизированная система функционального контроля испытаний энергоснабжения систем электропитания космических аппаратов / В.Н. Мишин, И.В. Целебровский, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский // *Электротеплоэнергетика*. – 2014. – № 3. – С. 56–60.

17. ESC Energy Supplies group. Нагрузочные модули: портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.loadbank.ru/catalog> (дата обращения: 10.05.2019).

18. Силин Е. Программируемые электронные нагрузки Chroma 63800-ТЕСТ // *Силовая электроника*. – 2013. – № 5. – С. 110–111.

19. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов / Ю.А. Кремзуков, В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 86 с.

20. Шурыгин Ю.А. Нелинейный элемент для имитатора солнечных батарей / Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Андреев, О.В. Бубнов // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 135–138.

21. Шкуратов А.В. Формирователь аналоговых вольт-амперных характеристик для имитатора солнечной батареи / А.В. Шкуратов, А.В. Петровский // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 93–97.

22. Шостак В.Ф. Исследование имитатора солнечной батареи на базе источника напряжения с безынерционным ограничением тока / В.Ф. Шостак, Т.В. Горлова, М.Г. Когдась // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – 2012. – Вып. 3. – С. 20–23.

dicted dependability, storage battery simulator, solar array simulator, electric load simulator.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-95-102

References

1. TASS. *Angol'skij telekommunikacionnyj sputnik «Angosat-1»*. Dos'e: portal [TASS. Angolan telecommunication satellite «Angosat-1». Dossier: portal]. Available at: <https://tass.ru/info/4847125> (Accessed: January 27, 2019) (in Russ.).

2. Kurenkov V.I., Volotsuev V.V. *Nadejnost izdeliy i sistem raketno-kosmicheskoy tehniki. Elektronnyy kurs lektsiy Samara* [Reliability of products and systems of rocket and space technology. Lecture course]. Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskij universitet, 2010, 55 p. (in Russ.).

3. Matveevskiy V.R. *Nadejnost tehnicheskikh sistem. Uchebnoe posobie* [Reliability of technical systems. Tutorial]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki. 2002. 113 p. (in Russ.).

4. Jadnov V.V., Sarafanov A.V. *Upravlenie kachestvom pri proektirovanii teplonagrujennyih i radioelektronnyih sredstv* [Quality management in the design of heat-loaded and electronic equipment]. Moscow, SOLON-Press, 2004, 464 p. (in Russ.).

5. AO Informatsionnyie sputnikovyie sistemy imeni akademika M.F. Reshetneva. *Kosmicheskie apparaty AO ISS* [JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems]. Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft> (Accessed: February 02, 2019).

6. Nauchno-proizvodstvennoe obединenie imeni S.A. Lavochkina. *Proekty* [Lavochkin Association. Projects]. Available at: <https://www.laspace.ru/projects> (Accessed: February 02, 2019).

7. Mizrah E.A., Lobanov D.K., Poymanov D.N., Balakirev R.V., Kopylov E.A., Shtabel N.V. *Elektricheskiy imitator akkumulyatornoy baterei s zaschitoy po toku i napryazheniyu i ustroystvo zaschityi elektricheskogo imitatora akkumulyatornoy batarei* [Electric battery simulator with current and voltage protection and protection device for electric battery simulator]. Patent RF, no. 2635897, 2016.

8. Pushkin V.I., Gurtov A.S., Minenko S.I., Fomakin V.N., Petrenko Yu.D. *Stend dlya modelirovaniya sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Stand for modeling a spacecraft power system]. Patent RF, no. 2349518, 2009.

9. Holding Informtest. *Produktsiya, Sistemyi funktsionalnogo kontrolya* [Holding Informtest. Products, Functional Control Systems]. Available at: <http://www.informtest.ru/produktsiya/functional-control-systems> (Accessed: February 05, 2019).

10. Keysight Technologies. *Resheniya dlya modelirovaniya sputnikovyih energosistem* [Satellite Power System Simulation Solutions]. Available at: <https://www.keysight.com/ru> (Accessed: February 05, 2019).

11. Bazilevskiy A.B., Kozlov A.G., Lukyanenko M.V., Sheludko V.G. *Sistemyi sputnikov svyazi: Uchebnoe posobie po kursu Sistemyi elektrosnabzheniya letatelnyih apparatov dlya studentov priborostroitel'nogo fakulteta* [Communication satellite systems: A manual for the course Aircraft Power Supply Systems for students of the Instrument Engineering Faculty]. Krasnoyarsk, 1989, 224 p. (in Russ.).

12. Kulandin A.A., Timashev S.V., Zaytsev I.V. *Energeticheskie sistemyi kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft energy systems]. Moscow, Nauka, 1994, 283 p. (in Russ.).

13. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyishev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemyi elektropitaniya kosmicheskikh appa-*

Юдинцев Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, директор

Научно-исследовательского института автоматизации и электромеханики (НИИ АЭМ) ТУСУРа

Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034

Тел.: +7-960-973-03-03

Эл. почта: yag@niiaem.tomsk.ru

Yudintsev A.G.

Energy conversion complexes for ground testing of spacecraft power supply systems

A review of existing spacecraft power systems over the past 20 years has been carried out, using data from leading domestic enterprises of the rocket and space industry. The basic requirements for modern energy conversion test complexes are formulated. The stages of ground technical testing spacecraft power systems and types of control and test equipment are classified. The block diagrams of the spacecraft power systems that have found the greatest application are considered. The possible variants of the structural implementation of power energy converting complexes – an automated testing system, simulators of the elements of spacecraft power systems are presented, their main advantages and disadvantages are analyzed.

Keywords: spacecraft power systems, energy conversion equipment, technical ground testing, test equipment, pre-

ratov [Spacecraft Power Systems]. Novosibirsk, VO Nauka, Sibirskaya izdatelskaya firma, 1994, 318 p. (in Russ.).

14. Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Shurygin Yu.A. [The automated workstation for testing the energy-converting equipment of the spacecraft's power supply system]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, v. 20, no. 3, pp. 35–39 (in Russ.).

15. Brorin Ed. [Variants of the solution source-receiver current for testing the power supply system of the satellite]. *Power electronics*, 2014, no. 4, pp. 68–70 (in Russ.).

16. Mishin V.N., Tselebrovskiy I.V., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Yudin'tsev A.G., Rulevskiy V.M. [The automated system for functional control of tests of power supply for spacecraft power systems]. *Power supply*, 2014, no. 3, pp. 56–60 (in Russ.).

17. ESC Energy Supplies group. Nagruzochnyie moduli [ESC Energy Supplies group. Load modules]. Available at: <http://www.loadbank/ru/catalog> (Accessed: May 10, 2019).

18. Silin E. Programmiruemye elektronnye nagruzki Chroma 63800-TECT [Programmable Electronic Loads Chroma 63800-TEST]. *Power supply*, 2013, no. 5, pp. 110–111 (in Russ.).

19. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Rulevskiy V.M., Shinyakov Yu. A., Shurygin Yu.A. *Proektirovanie modulnyih imitatorov solnechnyih batarey avtomatizirovannoy kontrolno-ispyitatel'noy apparaturyi sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh*

apparatov [Design of modular simulators of solar panels for automated test equipment of power systems for automatic spacecraft]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2014, 86 p. (in Russ.).

20. Shurygin Yu.A., Andreev Yu.A., Bubnov O.V. [Non-linear element for solar simulator]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 135–138 (in Russ.).

21. Shkuratov A.V., Petrovskiy A.V. [The shaper of analog current-voltage characteristics for a solar battery simulator]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 93–97 (in Russ.).

22. Shostak V.F., Gorlova T.V., Kogdas' M.G. [The research of a solar cell simulator based on a voltage source with inertialess current limitation]. *Visnik KrNU imeni Mihajla Ostrograd'skogo*, 2012, no. 3, pp. 20–23 (in Russ.).

Anton G. Yudin'tsev

Doctor of Engineering Science, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR)
34, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7-960-973-03-03
Email: yag@niiuem.tomsk.ru