

УДК 621.31

О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.А. Пчельников, В.М. Рулевский, Ю.А. Шурыгин

## Автоматизированное рабочее место обработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата

Разработана автоматизированная система для измерения и функционального контроля параметров энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата с использованием имитаторов солнечных, аккумуляторных батарей и нагрузочных устройств, а также рассмотрен процесс испытаний энергопреобразующей аппаратуры космического аппарата в штатных и аварийных режимах работы.

**Ключевые слова:** автоматизированное рабочее место, автоматизированная система контроля, космический аппарат, энергопреобразующая аппаратура, система электропитания, имитатор тока нагрузки, имитатор солнечной батареи, имитатор аккумуляторной батареи, наземные испытания.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-35-39

Испытания космических аппаратов (КА) и их служебных систем, в том числе испытания энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания (ЭПА СЭП) на всех этапах производства, являются важной задачей создания высококачественной космической техники на предприятиях ракетно-космической отрасли. Современные мировые тенденции развития перспективных КА направлены на увеличение эффективности, совершенствование служебных систем и ресурса бортовой аппаратуры и КА в целом.

Современные электронные компоненты позволяют создавать СЭП КА с выходной мощностью 15–20 кВт, а в перспективе довести выходную мощность СЭП до 30–35 кВт со сроком активного существования до 10–15 лет [1, 2].

Данные тенденции предъявляют новые требования к повышению надежности ЭПА СЭП КА, что в свою очередь привело к необходимости решения новых сложных задач по созданию современного наземного испытательного оборудования. В результате решения данных задач создан класс инструментов, применяемых как в наземных испытаниях КА, так и в процессе исследования и настройки новых инженерных и технологических решений.

По мере накопления опыта по разработке и исследованию космической техники стало очевидным, что полная физическая имитация технических характеристик бортовых источников энергии требует слишком больших затрат.

Вследствие этого, полная физическая имитация технических характеристик бортовых источников энергии заменяется имитационно-физическим моделированием, при котором отдельные компоненты СЭП КА заменяются эквивалентами (имитаторами). Имитаторы позволяют с требуемой точностью воспроизвести характеристики устройств в реальном масштабе времени, при существенно меньших затратах, провести имитацию многократного изменения режимов функционирования бортовых источников электроэнергии.

В самом общем виде процесс испытания и исследования СЭП КА с помощью имитационного

моделирования может быть представлен в следующем виде (рис. 1):

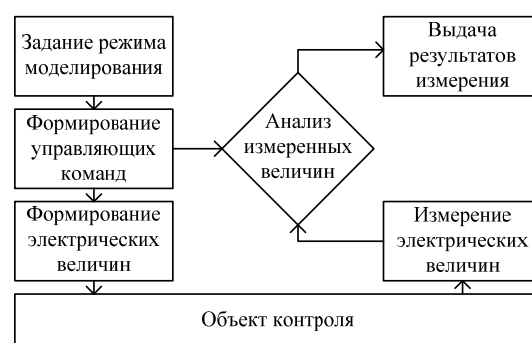


Рис. 1. Процесс испытания и исследования СЭП КА

Для реализации метода имитационно-физического моделирования многофункциональных структур ЭПА СЭП в рамках производства КА требуется система, выраженная в виде автоматизированного рабочего места испытаний ЭПА (АРМ ЭПА).

В НИИ АЭМ ТУСУРа в тесном сотрудничестве с ведущими предприятиями космической отрасли страны за последние 25 лет разработан целый ряд устройств и комплексов контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) ЭПА СЭП, позволяющей формировать АРМ различной конфигурации. Данный ряд включает в себя специализированные нагрузки ЭПА, силовые имитаторы солнечных и аккумуляторных батарей, а также автоматизированные системы контроля (АСК).

АРМ обработки и испытаний ЭПА СЭП КА представляет собой многофункциональную систему, выполненную в виде отдельных законченных устройств (рис. 2).

АРМ ЭПА представляет собой многофункциональную систему аппаратных и программных средств, размещаемых на рабочем месте оператора. Управление может осуществляться как в автономном, так и в комплексном режиме с автоматизированного рабочего места (РМ) оператора под управлением специального программного обеспечения (СПО). СПО обеспечивает реализацию рабочих ре-

жимов и алгоритмов функционирования системы путем обмена управляющей и измерительной информацией. АРМ ЭПА осуществляет самоконтроль основных электрических параметров, диагностику параметров питающей сети и исключает аварийные ситуации при несанкционированном пропадании напряжения питающей сети.



Рис. 2. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата

Ниже представлен пример выполнения АРМ ЭПА СЭП КА последнего поколения, используемого на одном из ведущих предприятий отрасли.

#### Структура автоматизированного рабочего места отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата

На рис. 3 представлена разработанная структурная схема АРМ ЭПА СЭП КА [3–7].

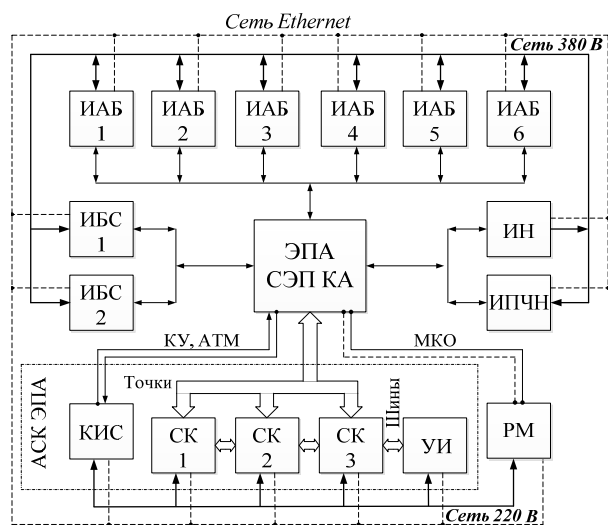


Рис. 3. Структурная схема АРМ ЭПА СЭП КА

На рисунке приняты следующие обозначения: ИАБ – имитатор аккумуляторной батареи; ИБС – имитатор солнечной батареи; ИН – имитатор нагрузки; ИПЧН – имитатор переменной частотно-регулируемой нагрузки; КИС – контрольно-испытательная станция; СК – системный коммутатор; УИ – устройство измерения; РМ – рабочее место оператора; КУ – команды управления; АТМ – аналоговая телеметрия; МКО – мультиплексный канал обмена.

АРМ позволяет реализовать полный комплекс наземных испытаний ЭПА СЭП КА, включающих специализированное энергоснабжение, все виды

нагрузок, измерение параметров, формирование команд управления и контроль телеметрии, а также непосредственное управление и регистрацию параметров ЭПА СЭП КА, используя мультиплексный канал обмена (МКО) информацией [8].

#### Состав автоматизированного рабочего места отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата

В ходе проведения наземных испытаний ЭПА для применяемых сегодня шин питания КА – 27, 40, 100 В вместо первичного источника энергии, т.е. солнечной батареи, используется безынерционный имитатор солнечной батареи (ИБС). Данное устройство имитирует статические и динамические характеристики солнечной батареи. ИБС позволяет воспроизводить работу солнечной батареи КА, находящегося на любом типе рабочей орбиты (геостационарная, круговая и др.), т.е. имеет возможность имитации режимов «вход в тень», «выход из тени», а также промежуточных, с изменением длительности данных режимов [6].

Имитатор аккумуляторной батареи (ИАБ) предназначен для воспроизведения режимов работы аккумуляторной батареи (АБ) при имитации токов разряда до 140 А, и заряда до 45 А для шины питания 27 В КА, указанных выше. ИАБ также осуществляет моделирование изменений напряжения на каждом аккумуляторном элементе, имитацию электрообогревателей, датчиков давления (для никель-водородной АБ) и датчиков температуры. ИАБ обеспечивает полноту электрических проверок силовых преобразователей и автоматики ЭПА КА при минимальных затратах времени [5].

Имитация динамических и статических режимов нагрузочных токов и бортового профиля потребляемой мощности, исследование быстродействия регуляторов и измерение выходного импеданса ЭПА в автоматическом и ручном режимах, а также оценка стабилизации выходного напряжения обеспечиваются с помощью имитатора статических и переменных частотно-регулируемых нагрузок (ИПЧН). ИПЧН позволяет формировать различные виды динамических нагрузок: импульсную разовую с током до 60 А и длительностью от 10 мкс до 200 мс; импульсную частотно-регулируемую со скважностью 2 до 60 А и частотой следования от 0,1 Гц до 100 кГц; синусоидальным током в выходных шинах ЭПА с размахом до 10 А и частотой от 20 Гц до 100 кГц. Импульсные нагрузки обеспечивают динамические режимы – увеличение (наброс) или уменьшение (сброс) тока нагрузки с регулируемой коммутационной длительностью подключения или отключения [7].

Имитация режимов постоянного тока нагрузки осуществляется с помощью имитатора нагрузки (ИН) в диапазоне от 0 до 360 А, для шины питания 27 В. ИН при имитации нагрузочных токов осуществляет рекуперацию электроэнергии в силовую трёхфазную сеть.

С учётом вышеуказанных значений выходной мощности современных СЭП КА и тенденции ее дальнейшего роста подобные решения являются перспективными в связи с требованием к современному оборудованию отвечать стандартам эффективности и энергосбережения.

Автоматизированная система контроля (АСК ЭПА) КА включает в себя системный коммутатор (СК), устройство измерения (УИ) и контрольно-испытательную станцию (КИС).

СК предназначен для подключения измерительных приборов, входящих в состав УИ, к любой из 1 800 точек объекта контроля и представляет собой управляемую релейную матрицу.

УИ обеспечивает поддержку связи со встроенными измерительными приборами, а также содержит управляемую релейную матрицу шинного коммутатора.

КИС подключена к ЭПА и используется для контроля состояния аналоговой телеметрии: аналоговых датчиков, релейных датчиков, контактных датчиков, датчиков температуры; формирования команд управления в виде импульсов напряжения или сухим контактом; контроля временных и амплитудных параметров импульсов напряжения; формирования автономных команд управления при непосредственном доступе оператора к включению и отключению объекта контроля; имитации резистивных датчиков и сопротивлений; измерения сопротивлений, прямых падений напряжений на диодах и контроля токов утечки диодов при обратном напряжении.

Силовая контрольно-проверочная аппаратура (КПА) снабжена программными протоколами, фиксирующими действия оператора и команды управления верхнего уровня, а также результаты измерений и мониторинга внутренней диагностики.

Все перечисленные устройства образуют сложную автоматизированную систему для функционального контроля ЭПА СЭП КА, для которой наиболее оптимальным выбором, с точки зрения управляемости и надежности, является многоуровневость структуры (рис. 4):

#### А. Нижний уровень

Нижний уровень (НУ) представлен платами со встроенными контроллерами, которые осуществляют измерение параметров и управляют протеканием физического процесса.

#### В. Средний уровень

Средний уровень (СУ) представлен платой промышленного компьютера формата PC/104, которая может комплектоваться преобразователями интерфейсов (RS-232 – RS-485, USB – RS-485) и платами расширения (8×RS-232, DIO 24/48 бит). Использование резистивного сенсорного монитора позволяет осуществлять автономное управление устройствами КПА. Обмен информацией с НУ происходит по стандартизированным протоколам передачи данных.

#### С. Верхний уровень

Верхний уровень (ВУ) представлен РМ оператора, в составе которого: сетевое оборудование, сервер, персональные компьютеры, мониторы, источ-

ники бесперебойного питания (ИБП), принтеры, СПО клиентов и сервера. Программное обеспечение (ПО) сервера ведет обмен информацией с СУ устройств системы и клиентами, используя интерфейс связи Ethernet.



Рис. 4. Структурная схема программного обеспечения АРМ ЭПА СЭП КА

### Рабочее место оператора автоматизированного рабочего места обработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата

Современные средства вычислительной техники в совокупности со специальным программным обеспечением позволяют существенно сократить сроки испытаний ЭПА СЭП КА, уменьшить влияние человеческого фактора, повысить качество и надежность исследуемой системы.

Разработанный испытательный автоматизированный комплекс для измерения и функционального контроля параметров ЭПА СЭП КА предназначен для проведения входного контроля аппаратуры регулирования и контроля (контроль разобценных и соединенных цепей), а также экспериментальной обработки ЭПА СЭП КА (комплексные испытания могут проводиться как со штатными комплектами СЭП, так и с участием имитационного оборудования).

Техническое обеспечение РМ оператора испытаний представлено следующим оборудованием (рис. 5):

- стол с установленной на кронштейне матрицей из шести мониторов диагональю 24" и разрешением 1920×1080 пикселей, отдельно стоящим цветным сетевым принтером формата А4, устройствами ввода информации;

- шкаф компьютерный (ШК) в составе: три персональных компьютера, ИБП (выходная мощность 2 кВА) и сетевые фильтры;

- шкаф серверный (ШС) в составе: сервер с установленной платой МКО, два неуправляемых сетевых коммутатора (на 16 и 8 портов), ИБП (выходная мощность 2 кВА) и сетевые фильтры.

В шкафах (ШК и ШС) установлена принудительная система охлаждения с датчиком температуры. Устройства ввода информации (клавиатура и манипулятор мышь) подключены к трем ПК через специальный аппаратный переключатель, с выведенным на стол пультом управления – таким образом, оператор может использовать один комплект устройств ввода на все ПК. ИБП обеспечивают работоспособность системы в течение 7 мин после пропадания напряжения питающей сети, этого времени достаточно чтобы завершить испытание (перевод ЭПА в исходное состояние, отключение имитаторов батарей и нагрузки).



Рис. 5. Рабочее место оператора АРМ ЭПА

Сервер выполняет роль шлюза, в составе аппаратного обеспечения сервера имеются 2 сетевые платы Ethernet, все устройства АРМ подключены к одному порту, а ПК и периферия – ко второму, при этом используется два коммутатора. Сервер имеет горячее резервирование по питанию и дисковый массив RAID 1. К портам RS-232 сервера подключены два ИБП для осуществления контроля над напряжением питающей сети. Плата МКО, установленная в сервере, имеет двукратное резервирование (2 основные и 2 резервные магистральные шины). Необходимость ввода в состав АРМ ЭПА трех ПК также обусловлена принципом повышения надежности системы в целом.

В состав СПО АРМ ЭПА входит ПО сервера и клиентское ПО. Функционал ПО сервера включает в себя:

- ведение процесса испытания, определение устройств «в сети», аварийных ситуаций до запуска испытания, управление ходом выполнения циклограмм (ЦГ);
- передачу команд управления (КУ) и телеметрии между клиентским ПО и ПО СУ устройств;
- применение индивидуальных тарифовых характеристик (ИТХ) к измеряемым параметрам, с последующей записью в протокол и передачей клиентскому ПО;
- предоставление программного доступа к интерфейсу МКО;
- централизованное хранение и редактирование конфигураций и циклограмм (ЦГ), доступ к данным с любого ПК-клиента;
- ведение протоколов работы устройств (сохранение срезов данных всех устройств каждые 10 с, а также по изменению сигнальных параметров ТС и КУ);

- синхронизация времени на всех устройствах системы;

- снятие информации о состоянии ИБП и ее последующая передача клиентскому ПО.

На каждый ПК установлены идентичные комплекты клиентского ПО, в случае выхода из строя двух ПК из трех испытание возможно завершить на оставшемся ПК. Комплект клиентского ПО представлен шестью программами для одновременного запуска на шести мониторах, компоновка свободная, определяется оператором испытания. В комплект входят следующие программы:

- программа «Аналоговые датчики» отображает информацию состояния датчиков шести АБ с устройства КИС в процессе испытаний: 16 ДТ, 30 АД, сопротивление изоляции, 6 дополнительных каналов измерения;

- программа «Состояние автоматики» содержит квитанции состояния 51 контактного датчика, 53 релейных датчиков, переданные с устройства КИС, имеется возможность конфигурировать источники опроса в следующих диапазонах: напряжение опроса контактного датчика  $U_{\text{опр.КД}}$  от 5 до 10 В, напряжение срабатывания контактного датчика  $U_{\text{сраб.КД}}$  от 0,5 до 1,0 В, ток опроса релейного датчика  $I_{\text{опр.РД}}$  от 10 до 100 мА, напряжение опроса релейного датчика  $U_{\text{опр.РД}}$  от 24 до 32 В, напряжение срабатывания релейного датчика  $U_{\text{сраб.РД}}$  от 0,5 до 1,0 В;

- программа «Команды управления» содержит именованные кнопки для отправки оператором КУ в ЭПА КА посредством устройства КИС, включая 2 стартовые технологические КУ, 1 матричную разовую КУ, 36 разовых команд, 9 технологических импульсных команд, 18 технологических длительных команд. Для всех КУ предусмотрена выдача команд, как по основному, так и по резервному линиям. Диапазоны конфигурирования параметров источников КУ: ток нагрузки по каждому каналу  $I$  – от 10 до 400 мА, амплитуда напряжения  $U$  – от 23 до 32 В, длительность команды  $T_{\text{длит}}$  – от 90 до 210 мс;

- программа «Имитаторы» позволяет получить доступ к удаленному управлению всем функционалом устройств: ИАБ, ИБС, ИН, ИПЧН и возможностью отображения всей диагностической информации;

- программа «ТК и ТС МКО» содержит доступ к элементам управления и телеметрии, передаваемой посредством интерфейса МКО. На экран выводится вся информация по трем зарядно-разрядным устройствам и шести аккумуляторным батареям;

- программа «Испытание и конфигурация комплексов» включает в себя редакторы: ЦГ (контроль цепей, освещенность-нагрузка), таблиц соответствия (для ЦГ контроль цепей, соответствие контактов устройства СК контактам на изделии), ИТХ (для датчиков КИС и МКО имеется 2 типа тарифовок: табличные, табличные с предобработкой по формуле линейного преобразования), испытания (задается список задействованных устройств, ЦГ, таблица соответствия). Все редакторы ЦГ работают с конфигурациями, находящимися на сервере, не создается локальных копий, тем самым все изменения сразу

же доступны на всех ПК. Главной частью программы является окно управления испытанием, здесь размещены элементы управления испытанием, отображена информация по подключенным в систему устройствам, заданным конфигурациям, осуществляется управление и наблюдение за ходом выполнения ЦГ.

В комплект клиентского ПО также входит программа «Просмотр архивов испытаний», которая имеет возможность получить информацию по текущему испытанию или по предыдущим. Данная программа предназначена для просмотра протоколов испытаний и построения графиков с возможностью экспорта данных.

#### **Заключение**

Разработан испытательный автоматизированный комплекс для измерения и функционального контроля параметров энергопреобразующей аппаратуры космического аппарата, позволяющий осуществлять полный комплекс наземных испытаний, а именно измерение, формирование команд управления, контроль и регистрацию параметров энергопреобразующей аппаратуры космического аппарата в автоматическом режиме, а также экспериментальную проверку с применением имитационного оборудования.

Имитаторы энергопреобразующей аппаратуры, входящие в состав автоматизированного комплекса, позволяют с требуемой точностью воспроизвести характеристики устройств в реальном масштабе времени при существенно меньших финансовых и временных затратах, провести имитацию многократного изменения режимов функционирования элементов системы энергообеспечения космического аппарата.

Современные средства вычислительной техники в совокупности с разработанным специальным программным обеспечением позволили существенно сократить сроки испытаний энергопреобразующей аппаратуры космического аппарата, уменьшить влияние человеческого фактора, повысить качество и надежность исследуемой системы.

#### *Литература*

1. Борисенко В.Ю. Энергопреобразующая аппаратура нового поколения / В.Ю. Борисенко, Р.В. Козлов, К.В. Тараканов // Тезисы докл. XIX науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства» / АО «НПП «Полус». – Томск, 2015. – С. 15–16.

2. Козлов Р.В. Обеспечение надежности системы электропитания космического аппарата как аппаратно-программного комплекса / Р.В. Козлов, И.А. Михеев // Тезисы докл. XIX науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства» / АО «НПП «Полус». – Томск, 2015. – С. 19–20.

3. Шурыгин Ю.А. Аппаратно-программный комплекс автоматизации процессов предстартовых испытаний систем энергообеспечения космических аппаратов / Ю.А. Шурыгин, В.Н. Мишин, Ю.А. Кремзуков // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 305–309.

4. Патент 90589 РФ, МПК G05B23/02. Автоматизированный комплекс наземного контроля и испытаний сис-

тем электроснабжения космических аппаратов / В.Н. Мишин, Г.А. Ракитин, В.А. Пчельников и др. – № 2 008 136 495; заявл. 10.09.08; опубл. 10.01.10. Бюл. № 1. – 3 с.

5. Патент 73102 РФ, МПК G06G7/63. Имитатор аккумуляторной батареи для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / В.Н. Мишин, О.В. Бубнов, В.А. Пчельников и др. – № 2 008 100 435; заявл. 09.01.08; опубл. 10.05.08. Бюл. № 13. – 2 с.

6. Патент 97007 РФ, МПК H01M14/00. Устройство для имитации секционированной солнечной батареи с общей шиной / В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, Ю.А. Кремзуков и др. – № 2 010 106 452; заявл. 24.02.10; опубл. 20.08.10. Бюл. № 23. – 3 с.

7. Патент 151494 РФ, МПК, G01R31/40. Энергосберегающий нагрузочный комплекс для испытаний систем электропитания космических аппаратов / В.Н. Мишин, О.В. Бубнов, В.А. Пчельников, А.Г. Юдинцев. – № 2 014 115 093; заявл. 15.04.14; опубл. 10.04.15. Бюл. № 10. – 3 с.

8. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. Взамен ГОСТ 26765–87. Введ. 05.06.2003. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 27 с.

---

#### **Бубнов Олег Викторович**

Зав. 14 отделом НИИ автоматики и электромеханики (АЭМ) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 56-00-59, доб. 05  
Эл. почта: oleg@niiiem.tomsk.ru

#### **Кремзуков Юрий Александрович**

Канд. техн. наук, зав. 18 отделом НИИ АЭМ  
Тел.: +7 (382-2) 56-00-59, доб. 20  
Эл. почта: kremzucov@niiiem.tomsk.ru

#### **Пчельников Виктор Алексеевич**

Заместитель директора по НР НИИ АЭМ  
Тел.: +7 (382-2) 56-00-59, доб. 03  
Эл. почта: pchelnikov@niiiem.tomsk.ru

#### **Рулевский Виктор Михайлович**

Канд. техн. наук, директор НИИ АЭМ  
Тел.: +7 (382-2) 55-61-96  
Эл. почта: rulevsky@niiiem.tomsk.ru

#### **Шурыгин Юрий Алексеевич**

Д-р техн. наук, первый проректор ТУСУРа, научн. руководитель НИИ АЭМ  
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: office@tusur.ru

Bubnov O.V., Kremzucov Y.A., Pchelnikov V.A., Rulevskiy V.M., Shurygin Y.A.

#### **Automated Control System of Power-conditioning Equipment**

The automated test system is designed to parameter measurements and functional control of a spacecraft power system using the solar and electrical battery simulators. The process of testing the power conditioning unit is considered under standard and emergency operating conditions.

**Keywords:** automated test system, spacecraft, power system, automated load current simulator, solar array simulator, battery simulation system, ground tests.