

Системы навигации и управления авиационно-космической техники

УДК 621.31

DOI: 10.14529/ctcr170414

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

С.В. Чубов, М.В. Михайлов, А.И. Солдатов

АО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск, Россия

Рассматривается вариант построения аппаратно-программного комплекса для испытаний системы питания и управления электроракетными плазменными двигателями на базе электронных управляемых нагрузок, источников питания и измерительной крейтовой системы LTR-EU-16-2 фирмы «Л Кард», которая имеет модульную архитектуру из 16 посадочных мест, позволяющую переукомплектовывать систему другими модулями или расширять конфигурацию. В основу программного обеспечения заложен системонезависимый интерфейс управления «клиент – сервер». Предложенное решение использования автоматического комплекса со стандартными электронными нагрузками и средствами сбора данных на основе модулей LTR41, LTR11, LTR210 с гальванической развязкой является предпочтительным, потому как позволит добиться высокой точности и скорости измерения, значительно уменьшит затраты и время на производство проверочного оборудования, а также повысит качество проведения испытаний с различными типами СПУ.

Ключевые слова: система питания и управления, аппаратно-программный комплекс, электроракетный плазменный двигатель.

Введение

В настоящее время для коррекции орбиты геостационарных космических аппаратов широко применяются электрореактивные двигательные установки на базе стационарных плазменных двигателей (СПД). Одним из основных блоков двигательной установки, существенно влияющим на ее выходные параметры и характеристики, является система питания и управления (СПУ).

Большой объем экспериментальных исследований в нормальных климатических условиях и при имитируемых воздействиях космических факторов требует разработки аппаратно-программного комплекса для испытаний СПУ. Подобные испытания представляют собой сложный процесс с применением специализированного проверочного оборудования [1–6]. Это оборудование должно выполнять следующие функции:

- реализовывать алгоритмы испытаний;
- регистрировать и отображать аналоговую и сигнальную телеметрию, выдаваемую системой;
- имитировать электрические цепи двигательной установки и контролировать качество их электропитания;
- выдавать команды управления на объект испытаний (СПУ).

Проверочное оборудование, работающее в ручном режиме под полным управлением оператора, применяемое на сегодняшний день, имеет ряд значительных недостатков в сравнении с автоматизированным:

- непрерывные манипуляции оператора;
- вероятность ошибок при выдаче команд и регистрации параметров оператором;
- большое количество специалистов при длительных испытаниях.

Перечисленные недостатки исключает предлагаемое решение аппаратно-программного комплекса испытательного оборудования, которое имеет следующие преимущества:

- проведение испытаний в автоматическом режиме по заложенным циклограммам и алгоритмам испытаний;
- отключение системы при прогнозировании аварийной ситуации;
- автоматическая регистрация параметров и запись их в журнал испытаний;
- оповещение оператора о выходе параметра за пределы заданного значения;
- масштабирование системы при увеличении числа контролируемых параметров, а также количества команд.

Предложенное решение АПК

В состав АПК (рис. 1) входят следующие основные элементы: персональный компьютер, измерительный крейт, электронные нагрузки, блок сопряжения, коммутации и нагрузок, источники питания, USB-разветвитель, LAN-коммутатор.

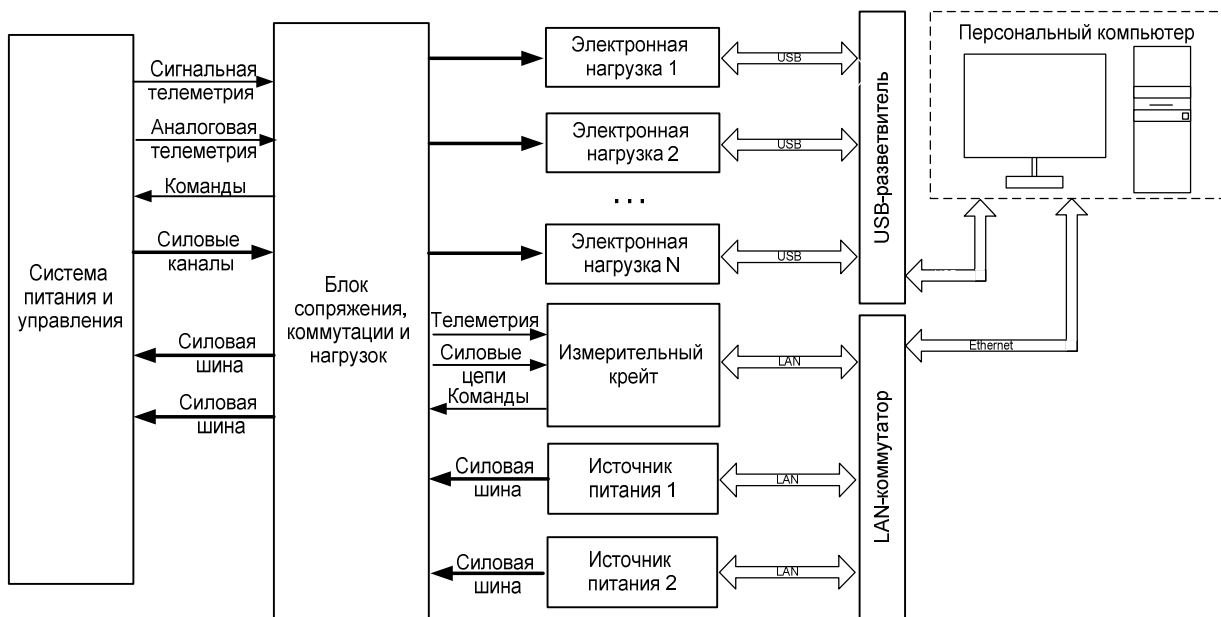


Рис. 1. Структурная схема АПК для испытания СПУ

Нагрузка в составе комплекса

Нагрузкой СПУ являются цепи электропитания СПД (рис. 2): анод; нагреватели катода; электроды поджига; магнитная катушка (возможен вариант последовательного соединения с цепью анода, без использования дополнительного источника питания); термодроссели. Также к нагрузке СПУ относится клапан двигателя, входящий в состав двигательной установки (см. таблицу, на рисунке не обозначен).

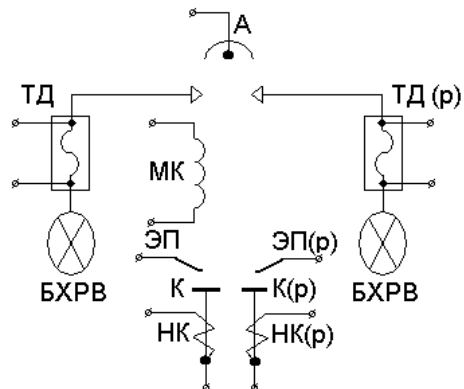


Рис. 2. Структурная схема цепей электропитания СПД: А – анод; НК, НК(р) – основной и резервный нагреватели катода; ЭП, ЭП(р) – основной и резервный электроды поджига; МК – магнитная катушка; ТД, ТД(р) – основной и резервный термодроссели; БХРВ – блок хранения рабочего вещества

Системы навигации и управления...

Качество отработки СПУ при наземных испытаниях во многом зависит от степени соответствия имитационных нагрузок реальному СПД. При испытаниях СПУ имитационная нагрузка устанавливается эквивалентно сопротивлению цепей с учетом свойственного им изменения электрических параметров в процессе работы.

Электрические параметры элементов электропитания СПД

Цепь	Параметр	Режим	Значения параметров		
			Двигатель СПД-140Д	Двигатель КМ-75	Двигатель М-100
А	$U_A, В$	Х. х.	≤ 350	≤ 900	≤ 350
		Рабочий	300^{+15}_{-30}	810^{+25}_{-35}	300^{+15}_{-17}
	$I_A, А$	R_k	$4,5 \pm 0,5$	$1,8 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,2$
		Номин.	$15,0 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,1$
		СТЗА	22 ± 1	$3,7 \pm 0,3$	$7,0 \pm 0,7$
	$R_A, Ом$	–	11–79	193–522	36–243
Тип нагрузки (количество, шт.)			ВК8522 (3)	АКИП-1350 (1)	ВК8522 (2)
НК	$I_{НК}, А$	$t = 180 с$	$17,0 \pm 0,5$	$8,5 \pm 0,25$	$12,0 \pm 0,3$
	$R_{НК}, Ом$		0,37–1,0	0,55–1,55	0,35–0,4
	Тип нагрузки (количество, шт.)			ВК8510 (1)	ВК8500 (2)
ТД	$I_{ТД}, А$	Дежурн.	1,5–1,75	$1,5 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$ (3,6–4)
		Номин.	0–4	0–4	0–4
	$R_{ТД}, Ом$	–	0,24–0,45	0,5–0,8	0,2–0,4
	Тип нагрузки			Резистивная	
МК	$I_{МК}, А$	–	$5,25 \pm 0,25$	$(6–10) \pm 0,25$	–
	$R_{МК}, Ом$		1,1–3,2	0,85–1,65	–
	Тип нагрузки (количество, шт.)			ВК8500 (1)	ВК8500 (1)
ЭП	$U_{ЭП}, В$	До зажиг.	320 ± 30		
		После зажиг.	20–40		
	$\Delta t_{и}, мкс$	–	70–140	40–70	70–140
	$R_{ЭП}, Ом$	До зажиг.	$3,0 \pm 0,5$	10 ± 1	$10\ 000 \pm 1000$
		После зажиг.	$5,0 \pm 0,5$	20 ± 10	$5,0 \pm 0,5$
Тип нагрузки			Резистивная		
КД	$U_{КД} / I_{КД}$	Вкл.	25–34 В	$0,74 \pm 0,06 А$	22,3–2,7 В
		Удерж.	$10,5 \pm 2,5 В$	$0,26 \pm 0,3 А$	8–13 В
	$R_{КД}, Ом$	–	210 ± 5	$8,5 \pm 0,3$	210 ± 5
	Тип нагрузки			Активно-индуктивная	

При этом все имитационные нагрузочные устройства должны работать подобно единой системе, имитируя всевозможные режимы работы в реальном режиме времени. В таблице указаны электрические параметры цепей трех различных типов двигателей, по которым ведутся исследования, направленные на создание и улучшение характеристик СПУ.

В качестве эквивалента цепей электропитания реального двигателя применимы два варианта нагрузок: резистивная и электронная. Для имитации маломощных цепей в составе комплекса используется резистивная нагрузка, так как при малой мощности использование электронной нагрузки экономически не выгодно. Для имитации мощных цепей служат электронные нагрузки.

У резистивной нагрузки имеются, прежде всего, следующие недостатки: большие массогабаритные показатели, что отрицательно сказывается на транспортировании испытательной установки от организации-изготовителя до организации-заказчика.

Электронная нагрузка имеет следующие преимущества:

- поддержание необходимых значений напряжения, тока, мощности и широкий диапазон их регулирования;
- возможность управлять режимами и контролировать электрические параметры как с помощью цифрового индикатора, расположенного на лицевой панели электронной нагрузки, так и через компьютерные интерфейсы, с целью интегрирования в автоматизированную систему испытательного оборудования;
- высокие показатели точности;
- различные режимы работы: постоянное напряжение, постоянный ток, постоянное сопротивление, постоянная мощность, динамический режим с регулируемой скоростью нарастания нагрузки.

Перечисленным требованиям удовлетворяют устройства от фирм BK Precision и АКПП. Для решения рассматриваемой задачи наиболее подходят модели BK8500, BK8510, BK8522, АКПП-1350 [7–8].

Источники питания

Питание СПУ обеспечивается с помощью дистанционно управляемых от ПК источников постоянного напряжения Agilent Technologies серии N8700, имитирующих силовые шины. Связь источников питания с ПК осуществляется по интерфейсу LAN. В выбранных источниках питания реализованы следующие важные функции:

- установка и измерение выходного напряжения;
- установка и измерение выходного тока;
- управление включением, выключением выхода;
- ограничение тока нагрузки.

Регистрация параметров

Измерение, регистрацию параметров (см. таблицу) и передачу их на ПК, а также выдачу команд в СПУ выполняет крейтовая система LTR-EU-16-2 фирмы «Л Кард», укомплектованная измерительными модулями LTR11, LTR210, LTR41 и модулем цифрового вывода LTR42.

Крейт LTR-EU-16-2 имеет модульную архитектуру из 16 посадочных мест, позволяющую перекомпоновать систему другими модулями или расширить конфигурацию. В основу программного обеспечения (ПО) управления заложен системонезависимый интерфейс управления «клиент – сервер». Основным вычислительным ресурсом крейта является сигнальный процессор Blackfin ADSP-BF537. Связь с ПК возможно осуществить с помощью интерфейса USB 2.0 или Fast Ethernet (100BASE-TX). Конструкция крейта переносная, возможна установка его в стойку 19" высотой 3U. Предусмотрена гальваническая развязка любого модуля от ПК.

Модуль LTR11 в составе крейта предназначен для измерения аналоговой телеметрии. Погрешность измерения в поддиапазоне 2,5–10 В составляет $\pm 0,05$ %. Модуль работает в 16-канальном режиме.

Модуль LTR210 служит для измерения сигнала поджига, позволяет записывать сигналы с частотой преобразования 5 МГц, имеет два канала аналого-цифрового преобразователя с разрядностью 14 бит. Основная приведенная к диапазону измерения относительная погрешность измерения напряжения постоянного тока составляет $\pm 0,2$ %.

Модуль LTR41 служит для регистрации сигнальной телеметрии. Он позволяет осуществлять цифровой ввод 16 TTL/CMOS-сигналов (5 В), а также сигналов (до 25 мА) с поканальной опторазвязкой.

Выдача команд производится с помощью модуля LTR42, который имеет 16 выводов через опторелейные выходы с поканальной гальванической развязкой.

Блок сопряжения, коммутации и нагрузок

Блок сопряжения, коммутации и нагрузок (рис. 3) выполняет согласование сигналов между СПУ и крейтом, гальваническую развязку между СПУ, крейтом и источником питания, защиту входных каскадов крейта от перенапряжения, индикацию сигнальной телеметрии и команд, выдачу и формирование команд.

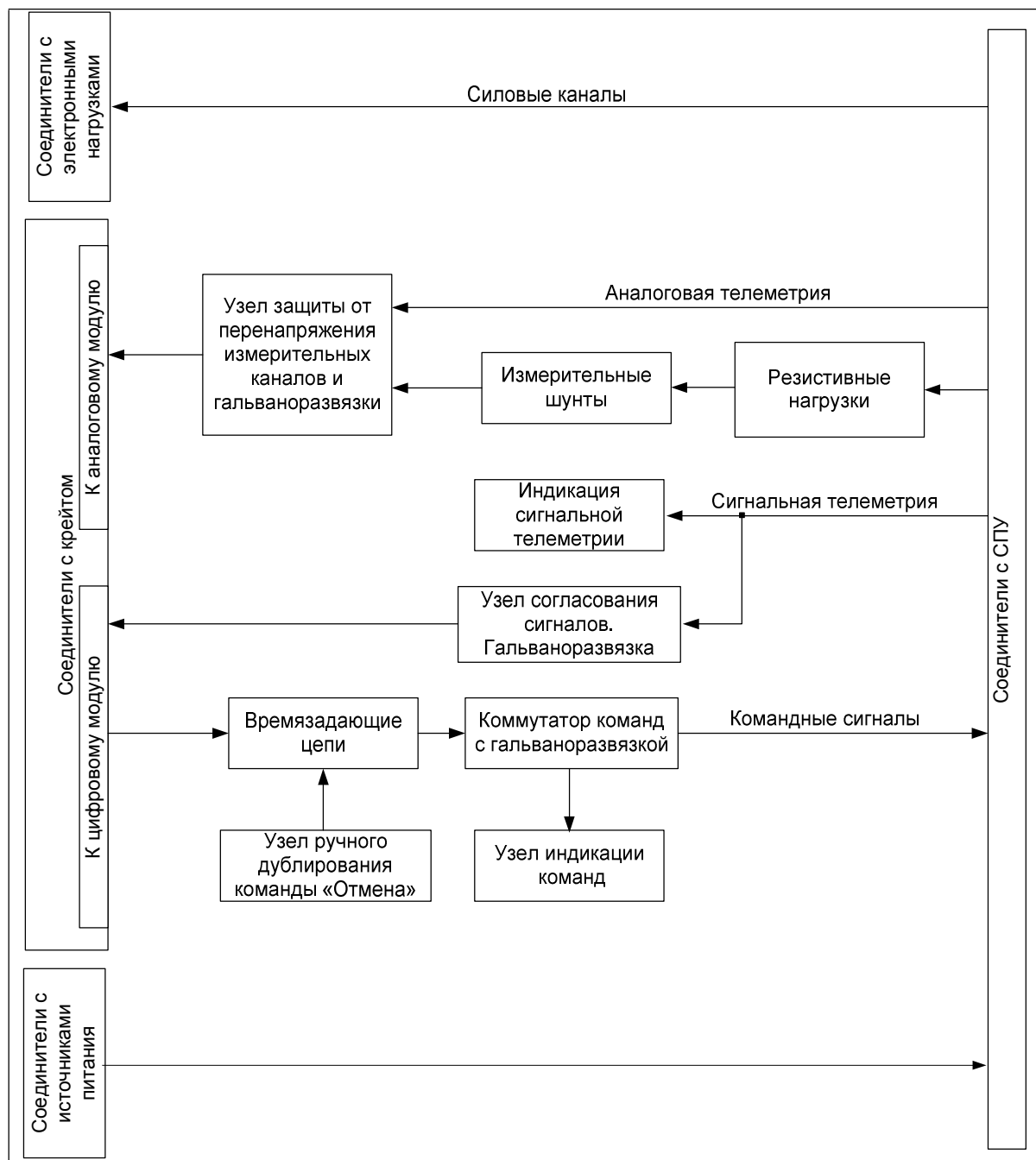


Рис. 3. Блок сопряжения, коммутации и нагрузок

Допустимое напряжение высокого уровня на входе измерительного канала аналогового модуля в составе АПК составляет не более 10 В. Узел защиты от перенапряжения измерительных каналов и гальваноразвязки служит для ограничения сигнала напряжением выше 10 В.

В составе узла содержатся защитные элементы (TVS-диоды) для ограничения мощных кратковременных импульсов перенапряжения, а также электромагнитные реле, размыкающие цепь при длительном воздействии перенапряжения.

Узел времязадающей цепи формирует в виде импульса команду заданной длительности при поступлении сигнала с модуля цифрового вывода. Сформированный импульс имеет длительность, в зависимости от установленных реле в системе, в диапазоне от 0,1 до 1 с.

Узел согласования сигналов понижает уровень сигнальной телеметрии до уровня, допустимого на входе цифрового модуля.

В случае сбоя работы ПК предусмотрен узел ручного дублирования команды «Отмена», по которой все узлы СПУ приводятся в исходное состояние.

Резистивные нагрузки внутри блока используются для маломощных цепей (см. таблицу).

Узел индикации команд предназначен для контроля прохождения команд и сигнальной телеметрии.

Персональный компьютер

Управление СПУ, обработка и отображение данных осуществляются с помощью ПК. Вычислительным ядром ПК является процессор Intel Core i5-6500. Для отображения информации используются два жидкокристаллических монитора размером 23".

Программное обеспечение

ПО разделяется на два уровня: нижний и верхний.

Нижний уровень ПО обеспечивает перераспределение потока данных между приборами, модулями и ПК.

ПО верхнего уровня обеспечивает работу крейтовой системы, а также источников питания и электронных нагрузок по заданным алгоритмам испытаний. Кроме того, ПО верхнего уровня служит для протоколирования, визуализации процесса испытаний и непосредственного управления этим процессом.

Для реализации ПО верхнего и нижнего уровня производители приборов предоставляют набор библиотек с функциями, которые необходимы для создания АПК, что сокращает времязатраты на разработку ПО.

В качестве инструмента проектирования ПО верхнего уровня выбрана графическая среда разработки LabView, которая позволяет быстро разрабатывать алгоритмы обработки сигналов и управления оборудованием в интуитивно понятном графическом виде.

Заключение

Предложенное решение использования автоматического комплекса со стандартными электронными нагрузками и средствами сбора данных является предпочтительным, потому как позволит добиться высокой точности и скорости измерения, значительно уменьшит затраты и время на производство проверочного оборудования, а также повысит качество проведения испытаний с различными типами СПУ.

Литература

1. Михайлов, М.В. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных систем электропитания плазменных двигателей / М.В. Михайлов, А.А. Мошняков // Решетневские чтения: материалы XIX междунар. науч. конф. – Красноярск, 2015. – С. 165–167.

2. Пат. 2220322 Российская Федерация, МПК⁷ F 03 H 1/00 (2000.01). Способ электропитания электроракетного плазменного двигателя и устройство для его осуществления / А.И. Чернышев, Ю.А. Шиняков, В.Н. Галайко, М.П. Волков, К.Г. Гордеев, И.Н. Горошков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственный центр «Полюс». – Опубл. 27.12.2003.

3. Пат. 2162623 Российская Федерация, МПК⁷ H 05 H 1/54, F 03 H 1/00. Система запуска и электропитания электроракетного плазменного двигателя / Н.М. Катасонов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственный центр «Полюс». – № 99107692/06; заявл. 05.04.1999; опубл. 27.01.2001.

4. Михайлов, М. В. Система электропитания и преобразования для электроплазменного двигателя космического аппарата / М.В. Михайлов, Н.М. Катасонов, А.И. Чернышев // Материалы первой международной конференции КОРУС'98. – Томск, 1998.

5. Михайлов, М. В. Исследование способов формирования импульсов поджига в объединенном устройстве запуска электроракетного плазменного двигателя / М.В. Михайлов, Н.М. Катасонов, А.И. Чернышев // Материалы 2-й международной конференции КОРУС'99. – Новосибирск, 1998.

6. Chubov, S.V. *Electronic Load as Part of the Test Complex of Power Processing Unit of Electric and Plasma Propulsion* / S.V. Chubov, A.I. Soldatov // 2-nd Inter. Conf. of Mechanical and Aeronautical Eng. (ICMAE 2016), 28–30 December. – Hong Kong, 2016.

7. *Электронные нагрузки* // B&K Precision. – <http://www.bkprecision.com/electronic-loads.html> (дата обращения: 01.04.2017).

8. *Продукция PRIST*. – <https://www.prist.ru> (дата обращения: 01.04.2017).

Чубов Сергей Вячеславович, аспирант, младший научный сотрудник, АО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск; chubov@tpu.ru.

Михайлов Максим Валентинович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, АО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск; info@polus-tomsk.ru.

Солдатов Алексей Иванович, д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник, АО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск; asoldatof@mail.ru.

Поступила в редакцию 30 мая 2017 г.

DOI: 10.14529/ctcr170414

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR TESTS POWER SUPPLY AND CONTROL SYSTEMS ELECTRIC PLASMA PROPULSION

S.V. Chubov, chubov@tpu.ru,

M.V. Mikhaylov, info@polus-tomsk.ru,

A.I. Soldatov, asoldatof@mail.ru

Scientific & Industrial Center “Polyus” (JSC), Tomsk, Russian Federation

This article provides a variant of constructing a hardware-software system for testing the power supply and control system of electric-plasma propulsion based on electronic controlled loads, power supplies and the LTR-EU-16-2 measuring crate system of the company “L Card”, which has a modular architecture of 16 seats, allowing you to re-complete the system with other modules or expand the configuration. The software is based on a system-independent client-server management interface. The proposed solution for using an automatic complex with standard electronic loads and data collection tools based on the LTR41, LTR11, LTR210 modules with galvanic isolation is preferable, because it will allow to achieve high accuracy and speed of measurement, will significantly reduce the costs and time for the production of verification equipment, and also Will improve the quality of testing with different types of power supply and control systems.

Keywords: power processing unit, hardware and software complex, stationary plasma thruster.

References

1. Mikhaylov M.V., Moshnyakov A.A. [Comparative Analysis of Russian and Foreign Power Supply for Plasma Thrusters]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIX mezhdunar. nauch. konf.* [Resetdevice Reading: Proc. of the XIX International Scient. Conf.]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 165–167. (in Russ.)

2. Chernyshev A.I., Shinyakov Yu.A., Galayko V.N., Volkov M.P., Gordeev K.G., Goroshkov I.N. *Sposob elektropitaniya elektroraketnogo plazmennogo dvigatelya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya*. [The Method of Power Supply of an Electric Plasma Rocket Engine and the Device for Its Implementation]. Patent RF, no. 2220322, 2003.

3. Katasonov N.M. *Sistema zapuska i elektropitaniya elektroraketnogo plazmennogo dvigatelya*

[The System of Starting and Power Supply of an Electrorocket Plasma Engine]. Patent RF, no. 2162623, 2001.

4. Mikhaylov M.V., Katasonov N.M., Chernyshev A.I. [Electropower Transformation System for Electrojet Plasma Thrusters of the Spacecrafts]. *Materialy pervoy mezhdunarodnoy konferentsii KORUS'98* [Proc. of KORUS'98 the 1-st Inter. Symp.]. Tomsk, Russia, 1998. (in Russ.)

5. Mikhaylov M.V., Katasonov N. M., Chernishev A.I. [Forming Modes Ignition Impulses Researching in the Combined Start-up Device of Electrojet Plasma Thruster]. *Materialy 2-y mezhdunarodnoy konferentsii KORUS'99* [Proc. of KORUS'99 the 2-nd Inter. Symp.]. Novosibirsk, Russia, 1999. (in Russ.)

6. Chubov S.V., Soldatov A.I. Electronic Load as Part of the Test Complex of Power Processing Unit of Electric and Plasma Propulsion. *2-nd Inter. Conf. of Mechanical and Aeronautical Eng. (ICMAE 2016)*, 28–30 December, Hong Kong, 2016.

7. *Elektronnyye nagruzki. B&K Precision*. [Electronic Loads. B&K Precision]. Available at: <http://www.bkprecision.com/electronic-loads.html> (accessed: 01.04.2017).

8. *Produktsiya PRIST*. [Production of PRIST] Available at: <https://www.prist.ru> (accessed 01.04.2017).

Received 30 May 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Чубов, С.В. Аппаратно-программный комплекс для испытаний системы питания и управления электроракетными плазменными двигателями / С.В. Чубов, М.В. Михайлов, А.И. Солдатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 134–141. DOI: 10.14529/ctcr170414

FOR CITATION

Chubov S.V., Mikhaylov M.V., Soldatov A.I. Hardware and Software Complex for Tests Power Supply and Control Systems Electric Plasma Propulsion. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 134–141. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170414