

УДК 629.783:007.52

## ПОСТРОЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2015 А. М. Безняков, В. А. Власов, Е. Н. Маленин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Изложены возможности роботизации системы ориентации солнечных батарей летательного аппарата на основе микропроцессора. Роботизация позволяет повысить автономность системы ориентации солнечных батарей и расширяет функциональность её устройства управления. Рассмотрен вариант роботизации электропривода ориентации солнечных батарей на базе микроконтроллера PIC16F873A для малого космического аппарата. Подобная реализация устройства управления позволяет осуществлять ориентацию солнечных батарей на Солнце, контролировать температуру и освещённость солнечных батарей, выполнять непрерывное регулирование мощности солнечных батарей в оптимальной рабочей точке вольтамперной характеристики, управлять процессом заряда и разряда аккумуляторной батареи, управлять стабилизацией напряжения на шинах нагрузки, сообщать бортовой цифровой вычислительной машине об аварийных режимах и нештатных ситуациях. Кроме того, в представленном устройстве управления реализован автономный режим работы – «следающий привод». Представлены результаты структурного и математического моделирования подобной системы и её реализация в виде физической модели. Разработанная модель системы ориентации солнечных батарей позволяет в лабораторных условиях проанализировать работоспособность системы в различных режимах, сопряжение отдельных элементов и узлов, а также реализовать работу системы под управлением персонального компьютера или при автономной работе от программы микроконтроллера.

*Роботизация, микроконтроллер, система ориентации солнечных батарей, космический аппарат, привод системы ориентации, шаговый двигатель.*

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-9-17

Значение робототехники для развития исследований и освоения космоса очевидно и не требует дополнительных обоснований [1]. Накопленный опыт применения робототехнических систем в околоземном и дальнем космосе показывает, что научно-технический уровень современной робототехники соответствует первоочередным задачам, поставленным перед ней в области космической техники. Большие перспективы следует ожидать от уже формирующейся качественно новой робототехники завтрашнего дня.

Для успешного решения проблемы повышения производительности и автономности роботизированных технических систем требуется выявить и устранить «узкие места», обеспечить эффективное управление системами космического аппарата (КА), где решающую роль до сих пор играют люди, а не машины. Используя обширный набор стандартных устройств («кубиков» автоматизации), можно поэтапно решать вопросы более

эффективного обнаружения, перемещения, позиционирования, ориентации, обработки информации и т.д. [2]. До тех пор, пока работа систем КА не проанализирована достаточно тщательно, а в их состав не включены основные компоненты автоматизации, их роботизация проблематична. Это связано с тем, что сами роботы сконструированы из базовых компонентов автоматизации. При этом некоторые компоненты широко применяются во всех технических системах, например, выключатели, двигатели, приводы. Необходимо установить область применения этих компонентов, проанализировать возможность их объединения в системы для автоматизации с целью повышения производительности и автономности технических систем КА.

В связи с разнообразием компонентов автоматизации необходимо разделить все компоненты на следующие классы: устройства управления, датчики, исполнительные механизмы и приводы [2].

Примерная взаимосвязь перечисленных выше компонентов представлена на рис. 1. Обычный способ управления системой ориентации (СО) солнечной батареи (СБ) КА осуществляется бортовой цифровой вычислительной машиной (БЦВМ) и иногда требует участия человека (расчёты наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ)). Подобный способ управления подразумевает необходимость управления по радиоканалу, а значит и наличие приёмопередающего устройства (ППУ). Кроме того, для согласования интерфейса между БЦВМ и электромеханическим приводом (ЭМП) в системе должно быть преобразующее устройство (ПУ). Для обратной связи исполнительного механизма с БЦВМ необходимо наличие датчиков.

При роботизированном способе управления применяется локальный контроллер – устройство управления (УУ), который позволяет разгрузить БЦВМ, расширить функциональные возможности системы, увеличить её надёжность (посредством сокращения электронных компонентов) и уменьшить её стоимость. Подобный способ управления позволяет уменьшить участие человека в работе системы и как следствие отпадает необходимость в постоянном наличии радиоканала.

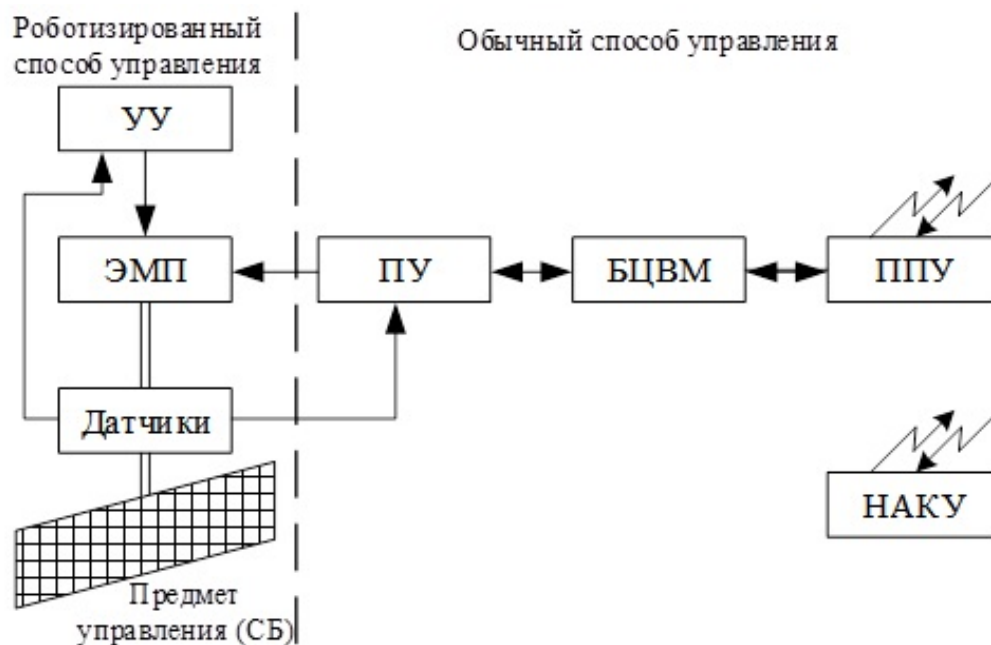


Рис. 1. Взаимосвязь компонентов роботизации при управлении системой ориентации СБ КА

Для космической отрасли начало века ознаменовалось внедрением в бортовую и наземную космическую технику встроенных микропроцессоров (микроконтроллеров) для разгрузки управляющей ЭВМ (БЦВМ) от функций сбора, предварительной обработки и буферизации контролируемой информации. Цифровые системы управления с программируемыми микроконтроллерами коренным образом изменили привычные свойства управляющей и регулирующей аппарату-

ры, расширили их функциональные возможности по адаптации к эксплуатационным условиям, гибкости алгоритмов управления и защиты от аварийных режимов. Вместе с тем, системы автоматического управления на микроконтроллерах относятся к цифровым сугубо нелинейным системам с квантованием по уровню и по времени [3] и с запаздыванием в контуре коррекции управляющего воздействия.

В настоящее время микроконтроллеры комплектуются множеством встроенных периферийных модулей [3] таких, как многоканальный аналого-цифровой преобразователь, широтно-импульсный модулятор, интерфейсные модули последовательного и переменного обмена данными, модули таймеров и т.д. Таким образом, с помощью микроконтроллера, устройств сопряжения и исполнительных механизмов возможно осуществлять ориентацию СБ на Солнце, контролировать температуру и освещённость СБ, выполнять непрерывное регулирование мощности СБ в оптимальной рабочей точке, управлять процессом заряда и разряда аккумуляторной батареи (АБ), управлять стабилизацией напряжения на шинах нагрузки, сообщать БЦВМ об аварийных режимах и нештатных ситуациях.

На рис. 2 в качестве примера представлена структурная схема СО СБ с управлением на базе микроконтроллера и

цифровым электроприводом [4]. При этом функции устройства управления на микроконтроллере существенно расширены, например, при помощи датчика освещённости (ДО) и датчика температуры (Д) измеряются соответственно освещённость и температура СБ. Датчик освещённости впервые вступает в работу для первичной ориентации КА на Солнце, то есть в режиме «закрутка». Этот режим позволяет найти положение СБ с максимальной освещённостью для восполнения энергии АБ, потраченной при пуске. Значение температуры необходимо учитывать при использовании термостатируемых панелей СБ, а также при реализации режима «контрольные сутки по СЭП» [5]. При помощи датчиков напряжения (ДН) и тока (ДТ) рассматриваемое УУ может учитывать текущее потребление энергии и управлять регулирующим элементом стабилизатора напряжения (СН) аккумуляторной подсистемы (АПС).

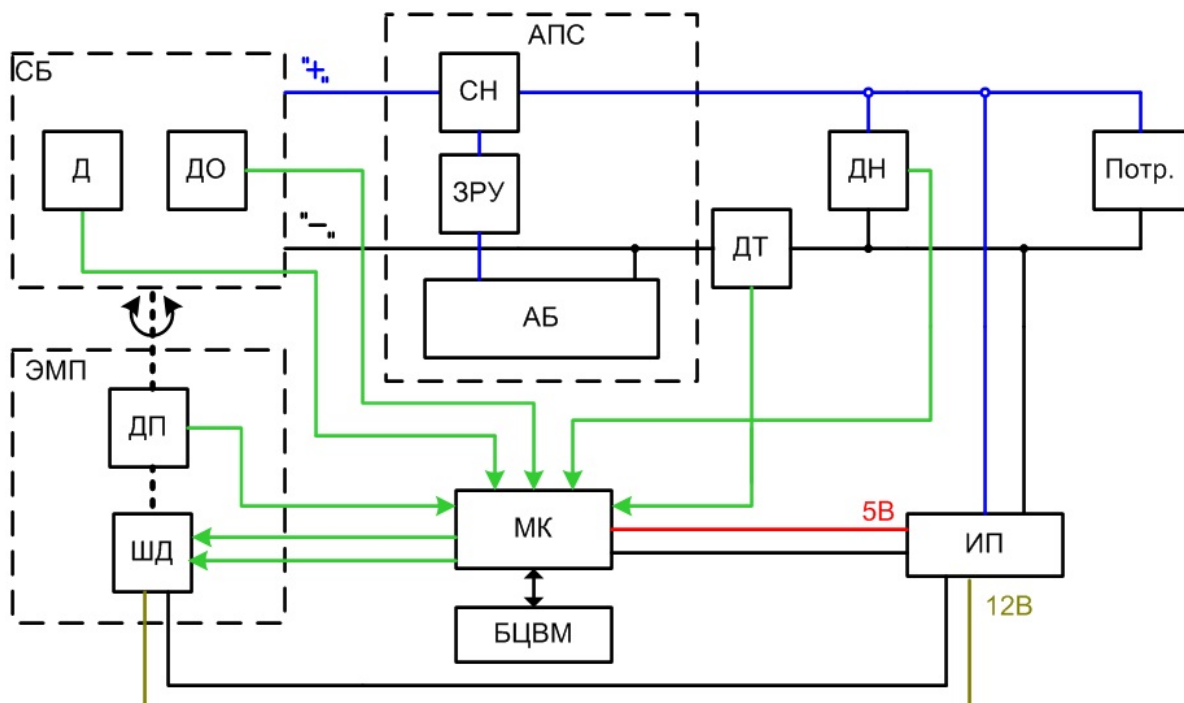


Рис. 2. Структурная схема роботизированной СО СБ

Следует отметить, что современные микроконтроллеры могут быть перепрограммированы «на месте», то есть уже установленными на печатную плату (непосредственно в устройство).

Таким образом, существует возможность корректировки программы управления адекватно возникновению (изменению) возмущающих факторов, что может быть связано, например, с деградацией элементов системы электроснабжения. Функция корректировки программы управления может быть возложена на БЦВМ, которой достаточно на короткое время перевести микроконтроллер из режима работы в режим программирования.

Ещё одной особенностью микроконтроллеров является наличие встроенной памяти, как оперативной, так и энергонезависимой, что позволяет хранить текущее и заданное состояние контролируемых параметров, а также восстанавливать текущий режим работы при сбоях.

Несомненным достоинством микроконтроллеров является и экономичное энергопотребление. В режиме работы они потребляют ток порядка десятков миллиампер, а в режиме ожидания – единицы микроампер. В зависимости от вида орбиты КА микроконтроллер может находиться в дежурном режиме большую часть времени и «просыпаться» по прерыванию для опроса датчиков и (при необходимости) изменения положения СБ, что в условиях дефицита энергии является весьма актуальным.

Применение микроконтроллера в бортовой и наземной аппаратуре [4] позволяет реализовать цифровой электромашинный привод (ЭМП) на базе шагового

двигателя (ШД). Выбор в пользу ШД для данного варианта СО СБ обусловлен достоинствами ШД: прецизионное позиционирование, полный момент в режиме остановки, возможность оперативного управления, лёгкость регулирования скорости вращения в широком диапазоне, простота согласования с простыми схемами управления, высокая надёжность, связанная с отсутствием щёток.

При этом срок службы ШД фактически определяется сроком службы подшипников, а однозначная зависимость положения ротора от количества управляющих импульсов обеспечивает позиционирование без обратной связи. Последнее достоинство выгодно отличает ШД от других типов двигателей, применяемых в СО СБ.

Недостатками ШД являются высокая стоимость, сложная схема управления, резонанс, невысокая удельная мощность, высокое потребление энергии даже без нагрузки. В то же время для коллекторных двигателей или двухфазных асинхронных двигателей, применяемых в настоящее время в ЭМП КА, необходима также сложная и дорогостоящая схема управления с обязательной обратной связью для точности позиционирования.

Наиболее перспективной для применения на КА является система электроснабжения с последовательно-параллельной структурой [5, 6]. Это связано с возможностью реализации на борту экстремального регулятора отбора мощности СБ. На основе структурной схемы СО СБ (рис. 2) была разработана электрическая функциональная схема, представленная на рис. 3.

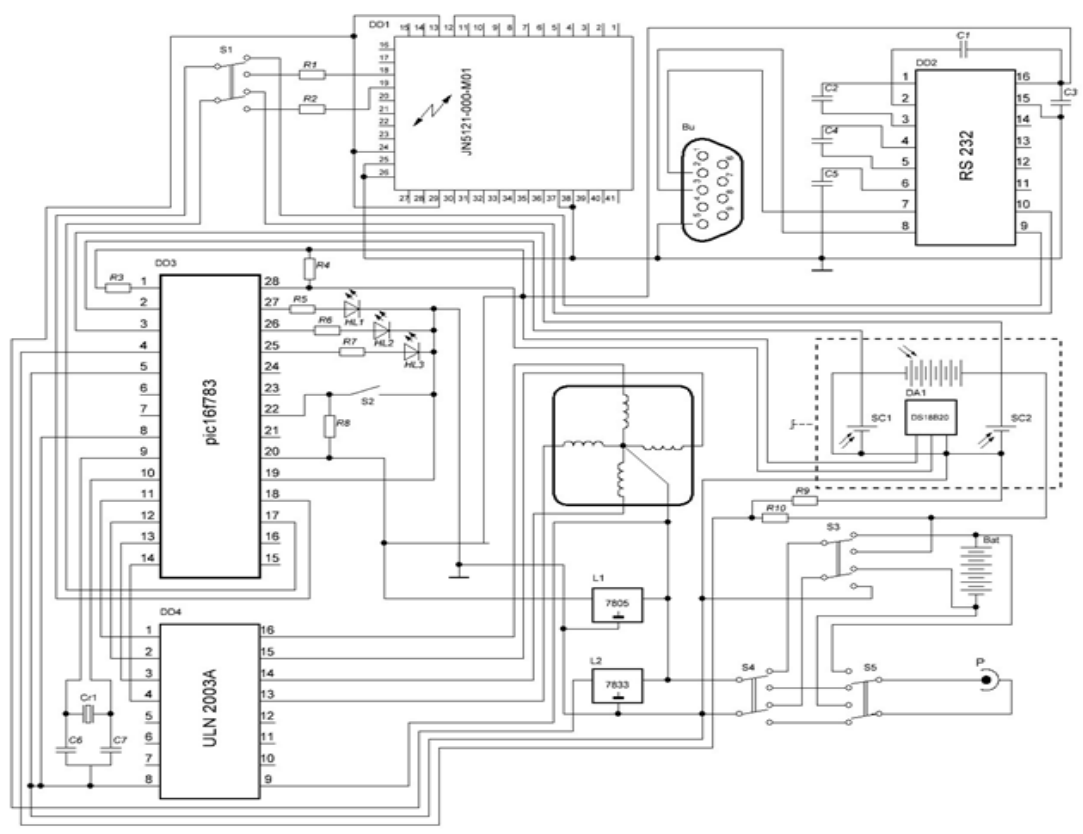


Рис. 3. Функциональная электрическая схема СО СБ с управлением на базе микроконтроллера

Управление ШД и другими узлами СО СБ реализовано на микроконтроллере PIC16F873A, наиболее подходящем по соотношению цена–качество, наличию встроенных модулей и доступности литературы по его описанию. Микроконтроллер содержит следующие основные модули:

захвата/сравнения/широкоимпульсной модуляции (ШИМ), последовательного интерфейса MSSP, USART, параллельного интерфейса PSP, 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя (имеющего пять каналов). Особенностью микроконтроллера является низкое энергопотребление в режиме «сна». Также существует возможность перехода на российский аналог – на микроконтроллер КР1830ВЕ32У.

Наличие множества встроенных периферийных модулей и широкие функциональные возможности позволяют реализовать и ряд смежных задач: измерения потребляемого тока, выходного напряжения СБ, освещённости и температуры СБ. В качестве датчика температуры приме-

нён цифровой термометр с программируемым разрешением DS18B20, которое может сохраняться в EEPROM памяти прибора. Этот датчик обменивается данными по 1-Wire шине и может быть как единственным устройством на линии, так и работать в группе. Полезная особенность DS18B20 – питание от шины данных. В качестве датчиков освещённости для экспериментального макета СО СБ используются отдельные солнечные элементы SC1 и SC2.

Рассматриваемая СО СБ может работать автономно, управляемая непосредственно заложенной в память микроконтроллера программой или по командам от внешней ЭВМ (БЦВМ), передаваемых по последовательному интерфейсу UART. Управление ШД осуществляется через специальный драйвер, например через ULN2003A.

С целью проверки работоспособности разработанной электрической схемы системы, сопряжения интерфейса передачи данных и решения задачи подбора

электронных компонентов было проведено моделирование в программной среде Proteus 7.7, результаты которого представлены на рис. 4.

К микроконтроллеру через драйвер подключён униполярный ШД с шагом  $1,8^\circ$  (либо  $0,9^\circ$  в полушаговом режиме). Последовательность управляющих импульсов на его обмотки отображена на виртуальном осциллографе (рис. 4). В качестве имитации управления от внешней ЭВМ используется виртуальный терминал, через который передаются команды и принимаются квитанции. На базе потенциометров и операционных усилителей реализованы модели датчиков освещённости. С их помощью в ручном режиме изменяется величина освещённости СБ и контролируется правильность работы автономного режима ориентации. Также с помощью потенциометра и переменного

резистора задаётся соответственно выходное напряжение и ток СБ, что позволяет контролировать управляющее воздействие (сигнал ШИМ) на рабочий орган импульсного стабилизатора напряжения.

Таким образом, проведённое моделирование подтвердило работоспособность представленной СО СБ с управлением на микроконтроллере, что дало возможность приступить к изготовлению её физической модели, внешний вид которой представлен на рис. 5.

Разработанная модель СО СБ позволяет в лабораторных условиях проанализировать работоспособность системы в различных режимах и сопряжение отдельных элементов и узлов. При этом осуществляется контроль параметров системы (температуры, тока нагрузки, выходного напряжения, освещённости СБ).

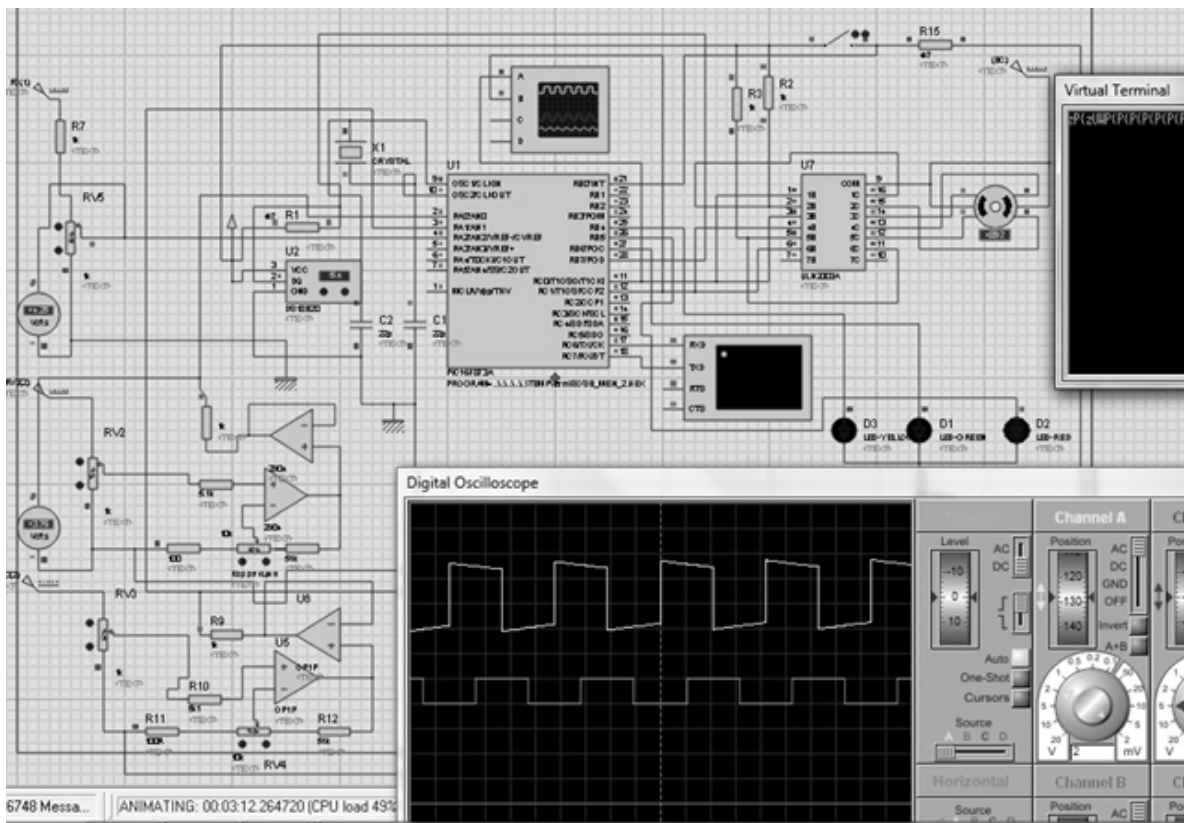


Рис. 4. Моделирование процесса функционирования СО СБ с управлением на базе микроконтроллера в среде Proteus

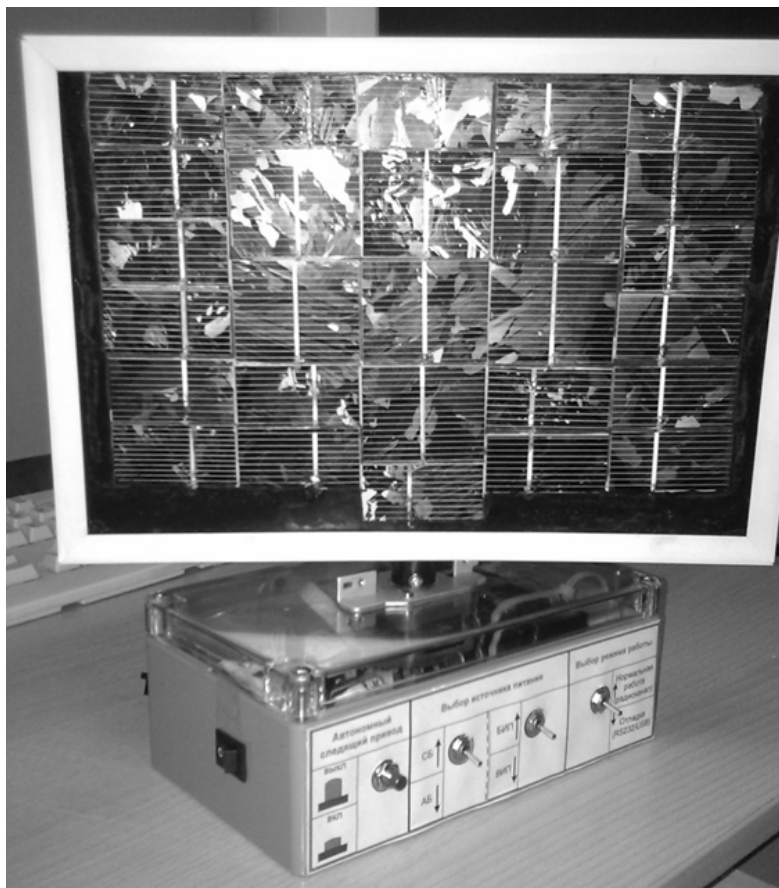


Рис. 5. Внешний вид модели СО СБ на микроконтроллере

Управление СО СБ может осуществляться от персонального компьютера по радиоканалу или по проводному интерфейсу (USB).

В представленной модели СО СБ реализован режим работы «следящий привод», позволяющий оценить результативность различных методов ориентации СБ на источник освещения, таких, как непрерывное слежения за источником освещения, коррекция при отклонении от нормали на заданный угол и переключение СБ с заданным интервалом. Разработанная модель позволяет реализовать перечисленные режимы как под управлением пер-

сонального компьютера (аналог БЦВМ на космическом аппарате), так и при автономной работе от программы микроконтроллера.

Применение роботизированной СО СБ с управлением на микроконтроллере на борту КА позволяет увеличить энергоприток от СБ, расширить функциональные возможности системы и её автономность. Использование микропроцессорных систем управления позволяет уменьшить массогабаритные показатели СО СБ, снизить её стоимость, увеличить надёжность и функциональность.

### Библиографический список

1. Лопота В.А., Минаков Е.П., Юрвич Е.И. Современное состояние и перспективы развития отечественной космической робототехники // Труды 11-ой

научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т. 5. СПб.: Астерион, 2008. С. 49-54.

2. Асфаль Р. Роботы и автоматизация производства. М.: Машиностроение, 1989. 448 с.

3. Казанцев Ю.М. Токовый стабилизатор напряжения солнечной батареи для систем электропитания космических аппаратов // Сб. науч. трудов «Электронные и электромеханические системы и устройства». Томск: НТЛ, 2011. С. 42–48.

4. Кохц Д. Измерение, управление и регулирование с помощью PIC микроконтроллеров. М.: МК-Пресс, 2007. 300с.

5. Власов В.А., Маленин Е.Н., Янгужов А.В. Вариант реализации цифрового

привода системы ориентации солнечных батарей для космического аппарата // Труды четвертой науч.-техн. конференции «Инновационный арсенал молодежи». СПб: ФГУП «КБ «Арсенал», 2013. С. 111-114.

6. Каргу Д.Л., Стеганов Г.Б., Петренко В.И., Власов В.А., Ратушняк А.И., Маленин Е.Н., Радионов Н.В. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей: уч. пособие. СПб: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2013. 116 с.

### Информация об авторах

**Безняков Алексей Михайлович**, кандидат технических наук, преподаватель кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. E-mail: [bez-al@mail.ru](mailto:bez-al@mail.ru). Область научных интересов: баллистика, системы электроснабжения космических аппаратов.

**Власов Вячеслав Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского. E-mail: [vlasovsl@rambler.ru](mailto:vlasovsl@rambler.ru). Область научных

интересов: системы электроснабжения космических аппаратов, планирование применения космических аппаратов, энергосберегающие технологии, робототехника.

**Маленин Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. E-mail: [vka\\_22kaf-maleninen@rambler.ru](mailto:vka_22kaf-maleninen@rambler.ru). Область научных интересов: баллистика, системы электроснабжения космических аппаратов, робототехника.

## DEVELOPMENT OF A SOLAR BATTERY ORIENTATION ROBOT SYSTEM FOR SMALL SPACECRAFT

© 2015 A. M. Beznyakov, V. A. Vlasov, E. N. Malenin

Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy,  
St. Petersburg, Russian Federation

Possibilities of robotization of an aircraft solar battery orientation system on the basis of a microprocessor are outlined in the paper. Robotization makes it possible to enhance the system's independence and widen the functionality of its control device. An option of robotization of a solar battery orientation electric drive based on a PIC16F873A microcontroller for small spacecraft is discussed. This implementation of a control device makes possible solar battery orientation to the Sun. It also allows controlling the temperature and illumination of the solar batteries, continuous adjustment of the solar batteries' capacity at the optimal point of the current-voltage characteristics, controlling the process of charging and discharging of the battery, controlling voltage stabilization on the power buses and communicating the information about emergencies to the onboard digital computer.



Besides, an autonomous mode of operation- a “servo-drive” is implemented in the proposed control system. The results of structural and mathematical modeling of a similar system and its implementation in the form of a physical model are presented. The developed model of a solar battery orientation system makes it possible to analyze the system’s operability in various modes, the integration of its separate elements and units in a laboratory environment and also to make the system operate under the control of a personal computer or off line with a microcontroller program.

*Robotization, microcontroller, solar battery orientation system, spacecraft, orientation system drive, step motor.*

## References

1. Lopota V.A., Minakov E.P., Yur-evich E.I. Current state and prospects of development of a domestic space robotics. *Actual problems of protection and safety. T.5.* SPb.: Asterion Publ., 2008. P. 37-40. (In Russ.)
2. Asfal R. *Roboty i avtomatizatsiya proizvodstva* [Robots and computer-aided manufacturing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 448 p.
3. Kazantsev Yu.M. The Tokovy voltage stabilizer of the solar battery for power supply systems of spacecrafts. *Electronic and electromechanical systems and devices: collection of scientific works.* Tomsk: NTL Publ., 2011. P. 42-48. (In Russ.)
4. Kokhts D. *Izmerenie, upravlenie i regulirovanie s pomoshch'yu PIC mikro-kontrollerov* [Measurement, control and regulation by means of PIC microcontrollers]. Moscow: MK-Press Publ., 2007. 300 p.
5. Vlasov V.A., Malenin E.N., Yanguzov A.V. Option of realization of a digital drive of system of orientation of solar batteries for the spacecraft. *The Innovative Arsenal of youth: works of the fourth scientific and technical conference.* SPb.: CB Arsenal Federal State Unitary Enterprise Publ., 2013. P. 111-114. (In Russ.)
6. Kargu L., Steganov G.B., Petrenko V.I., Vlasov V.A., Ratushnyak A.I., Malenin E.N., Radionov N.V. *Sistemy elektrosnab-zheniya kosmicheskikh apparatov i raket-nositeley: uch. posobie* [Systems of power supply for spacecraft and carrier rockets: study guide]. SPb.: Military Space Academy named after A.F. Mozhayskiy Publ., 2013. 116 p.

## About the authors

**Beznyakov Alexey Mihailovich**, Candidate of Science (Engineering), lecturer of the Department of Board Electrical Equipment and Energy Systems of flying vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhayskiy, Saint-Petersburg, Russian Federation. E-mail: [bez-al@mail.ru](mailto:bez-al@mail.ru). Area of Research: ballistics, spacecraft power supply systems.

**Vlasov Vyacheslav Aleksandrovich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Board Electrical Equipment and Energy Systems of flying vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhayskiy, Saint-

Petersburg, Russian Federation. E-mail: [vlasovsl@rambler.ru](mailto:vlasovsl@rambler.ru). Area of Research: spacecraft power supply systems, planning the use of spacecraft, energy saving technologies, robotics.

**Malenin Evgeny Nikolaevich**, Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Board Electrical Equipment and Energy Systems of flying vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhayskiy, Saint-Petersburg, Russian Federation. E-mail: [vka\\_22kaf-maleninen@rambler.ru](mailto:vka_22kaf-maleninen@rambler.ru). Area of Research: ballistics, spacecraft power supply systems, robotics.