

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт командных приборов, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТРОЙСТВА ПОВОРОТНОГО СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В работе рассмотрены вопросы создания системы управления исполнительного электропривода устройства поворотной солнечной батареи космического аппарата, отличающейся жесткими требованиями по отработке задаваемых угловых ускорений и скоростей вращения, при воздействии полезной нагрузки и возмущающих сил. Работа заключается в разработке системы управления, ее математическом описании, моделировании и изготовлении опытного образца устройства, отвечающего заданным техническим требованиям. В работе были применены методы математического и экспериментального исследования. Математическое моделирование системы проводилось средствами прикладной программы MATLAB/Simulink. В результате проделанной работы была предложена структурная схема системы управления исполнительного электропривода устройства поворотной солнечной батареи работающей следящей системы по заданному угловому положению, вычисленному необходимым для отработки заданных угловых скоростей и ускорений вращения образом. В статье представлены результаты математического моделирования работы исполнительного электропривода, а также приведены результаты, полученные при отработке заданной угловой скорости вращения реальным образцом устройства поворотной солнечной батареи. Произведен анализ и сравнение теоретических и практических результатов. Экспериментальное исследование продемонстрировало достижение цели при создании системы управления исполнительного электропривода, а также достаточно точное совпадение результатов моделирования и эксперимента. Предложенная система управления может быть использована при проектировании и создании устройств с аналогичными техническими требованиями.

**Ключевые слова:** исполнительный электропривод, устройство поворотной солнечной батареи, вентильный двигатель, система управления угловой скоростью, система управления угловым ускорением, обратная связь по углу.

**Введение.** Перспективы дальнейшего развития и совершенствования системы энергоснабжения спутниковых систем и орбитальных станций во многом связаны с совершенствованием алгоритмов управления солнечными панелями, ведь, как известно, потребление мощности излучения солнца считается одним из самых надежных и отработанных вариантов обеспечения космического аппарата (КА) электроэнергией [1, 2].

Современный исполнительный электропривод (ИЭП) устройства поворотной солнечной батареи (УПСБ) КА характеризуется низкими рабочими скоростями вращения выходного вала (ВВ), которые могут быть на уровне десятых, сотых и даже тысячных долей градуса в секунду. Специфическими особенностями ИЭП УПСБ являются необходимость ограничения ускорения вращения ВВ, уровень которого, при смене задаваемого значения скорости,

должен составлять тысячные доли градуса в секунду за секунду и наличие высокого момента сухого трения, возникающего в щеточно-коллекторном устройстве установленном для передачи энергии от солнечной батареи к системе энергообеспечения КА [3, 4].

Высокие требования к КА и его составным частям по ограничению габаритно-массовых параметров, стойкости к неблагоприятным факторам космического пространства, длительному сроку службы существенно влияют на структуру и состав электропривода. На ВВ УПСБ располагается датчик угла, предназначенный для выдачи информации об угловом положении солнечной батареи в систему управления КА. Разрешающая способность датчика угла ограничена указанными выше требованиями и обычно не превышает 16–18 разрядов двоичного кода.

Современный бортовой электропривод строится на основе вентильного двигателя без датчика положения ротора. Для расчета коммутационной функции управления вентильным двигателем используется пересчитанная информация с датчика угла ВВ [5].

Целью работы является создание системы управления ИЭП УПСБ КА, обеспечивающей высокие точностные показатели обрабатываемой угловой скорости и углового ускорения ВВ. При этом состав ИЭП не должен быть дополнен новыми элементами, что неминуемо приведет к ухудшению габаритно-массовых и надежностных характеристик УПСБ.

#### Математическая модель солнечной батареи.

Для достижения поставленной цели было проведено математическое моделирование системы управления ИЭП УПСБ. При этом основное внимание было уделено моделированию объекта регулирования, которым является солнечная батарея (СБ). СБ можно представить, как систему, состоящую из конечного числа элементов (определяется конструкцией СБ) [6, 7]. Упругое взаимодействие привода с объектом регулирования было представлено двухмассовой системой и описано следующим образом [7]:

$$J_{CB} \ddot{\alpha}_{CB} = C_1 \cdot (\alpha_{BB} - \alpha_{CB}) - \mu \cdot \dot{\alpha}_{CB},$$

где  $J_{CB}$  — приведенный момент инерции СБ;  $\alpha_{CB}$  — угол поворота СБ;  $C_1$  — угловая жесткость нагрузки,  $\alpha_{BB}$  — угол поворота ВВ,  $\mu$  — коэффициент демпфирования.

При этом был учтен момент упругой связи первого элемента СБ с ВВ, обеспечивающий имитацию торсионного эффекта, который является приложенным к ВВ моментом нагрузки. Уравнение движения первого элемента СБ, упруго связанного с ВВ:

$$\varphi_1 = W_1(s) \cdot \alpha_{BB},$$

где  $W_1(s)$  — передаточная функция элементов СБ по углу поворота стыка СБ.

$$W_1(s) = \sum_i \frac{\alpha_i}{P_i(s)},$$

где  $\alpha_i$  — угол поворота  $i$ -го элемента СБ,  $P_i(s)$  — передаточная функция  $i$ -го элемента СБ.

$$P_i(s) = \omega_i^2 + \varepsilon_i s + s^2,$$

где  $\omega_i^2$  — значение собственной частоты  $i$ -го элемента СБ,  $\varepsilon_i$  — коэффициент неупругого сопротивления  $i$ -го элемента СБ.

**Управление угловой скоростью.** Структурная схема системы управления угловой скоростью предполагает наличие измерителя скорости. Информацию об угловой скорости можно вычислить по показаниям датчика угла. Однако, как показано в [8], для качественного измерения угловых скоростей, указанных выше порядков, необходим датчик угла с разрешающей способностью 23–26 разрядов. В случае наличия датчика угла с малой разрешающей способностью целесообразным видится построение следующей системы управления угловой скоростью: интегрирование задающего скорость сигнала и последующая работа в режиме следящей системы по угловому положению ВВ [9, 10]. Структурная схема такой системы управления ИЭП УПСБ представлена на рис. 1, где И — интегратор задаваемой скорости вращения, РУ — регулятор контура угла, ВШИМ — векторный широтно-импульсный модулятор, КУМ — ключевой усилитель мощности, ДВ — двигатель, СБ — солнечная батарея, ДУ — датчик угла ВВ, ЭП — электронный преобразователь ДУ ВВ, УС — устройство сопряжения, МПИ — магистральный последовательный интерфейс, МК — микроконтроллер, БУУП — блок управления устройством поворотным, ИЭП — исполнительный электропривод,  $N_{\omega}$  — код задаваемой скорости вращения ВВ,  $N_{\phi}^{zag}$  — расчетный код поворота ВВ,  $\Delta N_{\phi}$  — сигнал рассогласования контура угла,  $N_{ШИМ}$  — входной код ВШИМ,  $T_d$ ;  $T_b$ ;  $T_c$  — длительности сигналов ВШИМ, управляющие КУМ,  $U_{амп1}$ ;  $U_{амп2}$ ;  $U_{амп3}$  — амплитудные значения линейных напряжений подаваемых на двигатель; угловое положение ВВ;  $\omega_{CB}$  — угловая скорость СБ;  $M_{упр}$  — момент упругости создаваемый СБ;  $N_{BB}$  — код измеренного угла поворота ВВ.

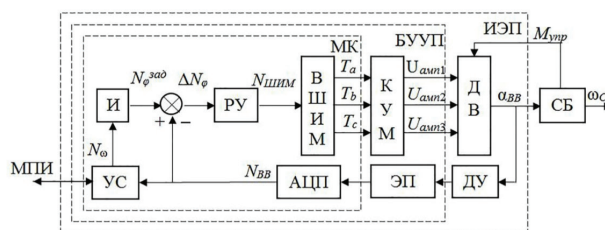


Рис. 1. Структурная схема ИЭП, работающего в режиме следящей системы по изменяющемуся углу

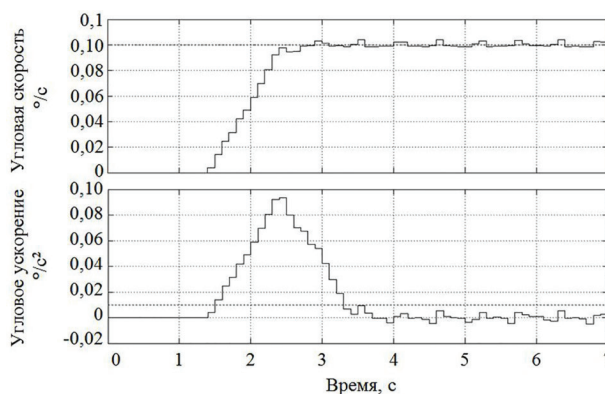


Рис. 2. Результаты моделирования работы ИЭП задаваемой угловой скорости 0,1 %/с

Результаты математического моделирования отработки ИЭП задаваемой угловой скорости  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$  при требуемом ускорении не более  $0,01 \text{ }^\circ/\text{с}^2$ , представлены на рис. 2. Угловая скорость ВВ УПСБ определялась как среднее скользящее по 16-битному коду углового положения. Можно отметить, что управление угловой скоростью ВВ УПСБ происходит с высокой точностью, однако на диаграмме ускорения видно многократное превышение углового ускорения ВВ заданной величины.

**Управление угловым ускорением.** На первый взгляд может показаться, что наиболее простым решением данной задачи могло бы быть ограничение амплитуды тока в обмотках двигателя и, как следствие, ограничение развиваемого им момента (ускорения). Однако в силу того что момент трения представляет собой переменную величину (точное значение которой неизвестно), зависящую от углового положения ВВ, температуры окружающей среды и иных параметров — настроить подобный «ограничитель тока» не представляется возможным.

Для разрешения этой проблемы было доработано программное обеспечение (ПО) микроконтроллера ИЭП, а именно — введен формирователь кода скорости ( $\Phi_\omega$ ), как показано на рис. 3.

Формирователь кода скорости после поступления  $N_\omega$  формирует линейно нарастающий (убывающий) код угловой скорости  $N_\omega^{расч}$  с ограничением, на уровне соответствующим коду  $N_\omega$ , скорость нарастания (убывания) расчётного кода угловой скорости вала двигателя определяется по разностному уравнению

$$N_\omega^{расч}(n) = k_{ИФ} \cdot T_s \cdot N_\omega(n) + N_\omega^{расч}(n-1),$$

где  $n$  — номер такта работы ИЭП,  $T_s$  — период дискретизации,  $k_{ИФ}$  — коэффициент интегратора формирователя.

$$k_{ИФ} = \varepsilon_{ВВ} \cdot \frac{1}{\omega_{ВВ}},$$

где  $\omega_{ВВ} = N_\omega(n) \cdot D_{ВВ}$ .

Для обеспечения требования технического задания по ограничению углового ускорения ВВ до  $0,01 \text{ }^\circ/\text{с}^2$  было выбрано задаваемое значение углового ускорения ВВ с двукратным запасом:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ВВ} = 0,005, \text{ при } N_\omega > N_\omega^{расч} \\ \varepsilon_{ВВ} = -0,005 \text{ при } N_\omega < N_\omega^{расч} \\ \varepsilon_{ВВ} = 0 \text{ при } N_\omega = N_\omega^{расч} \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{cases} k_{ИФ} = \frac{\varepsilon_{ВВ}}{N_\omega(n) \cdot D_{ВВ}}, \text{ при } N_\omega > N_\omega^{расч} \\ k_{ИФ} = \frac{-\varepsilon_{ВВ}}{N_\omega(n) \cdot D_{ВВ}}, \text{ при } N_\omega < N_\omega^{расч} \\ k_{ИФ} = 0, \text{ при } N_\omega = N_\omega^{расч} \end{cases}$$

Результаты математического моделирования работы ИЭП с формирователем задаваемой скорости  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$  представлены на рис. 4. Видно, что управление как угловой скоростью, так и угловым ускорением ВВ УПСБ происходит с требуемой точностью.

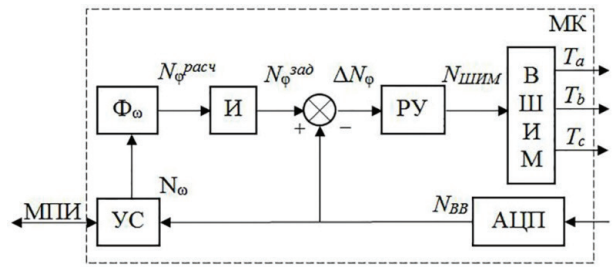


Рис. 3. Структурная схема МК ИЭП с формирователем кода угловой скорости

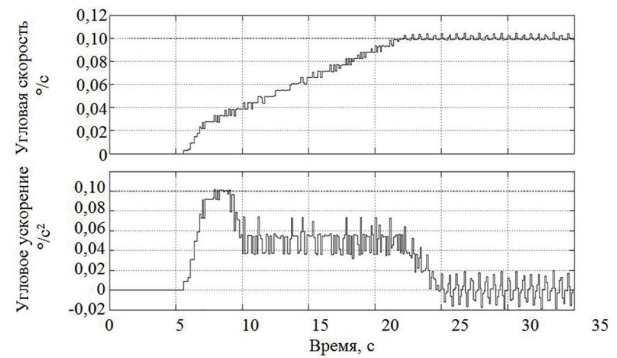


Рис. 4. Результаты моделирования работы ИЭП с формирователем скорости задаваемой угловой скорости  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$

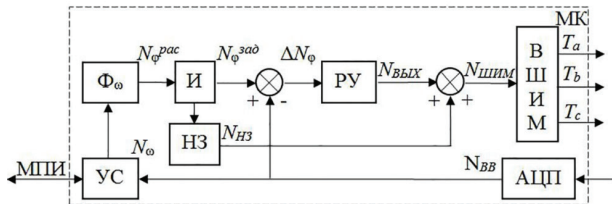


Рис. 5. Структурная схема МК ИЭП с формирователем скорости и нелинейным звеном

При этом время от подачи команды задания угловой скорости до начала движения составляет более 5 секунд, что связано с большой величиной момента сухого трения.

**Преодоление момента сухого трения.** В рассматриваемом УПСБ значение момента сухого трения может достигать 30 % от номинального момента вентильного двигателя (значение может меняться от прибора к прибору, зависит от углового положения ВВ и других параметров). Подобная величина момента трения может приводить к существенному (десятки секунд) увеличению времени реакции ВВ на заданный код скорости вращения.

Для решения задачи быстрого действия системы в контур регулирования включено нелинейное звено (НЗ), которое формирует код  $N_{НЗ}$  для повышения номинальной крутизны привода в области малых угловых рассогласований путём изменения рассчитанного кода  $N_{ШИМ}$  в зависимости от знака кода рассчитанной угловой скорости. Таким образом, структурная схема МК рассматриваемого ИЭП преобразовывается к виду, представленному на рис. 5, где НЗ — нелинейное звено,  $N_{ВЫХ}$  — выходное значение кода регулятора угла.



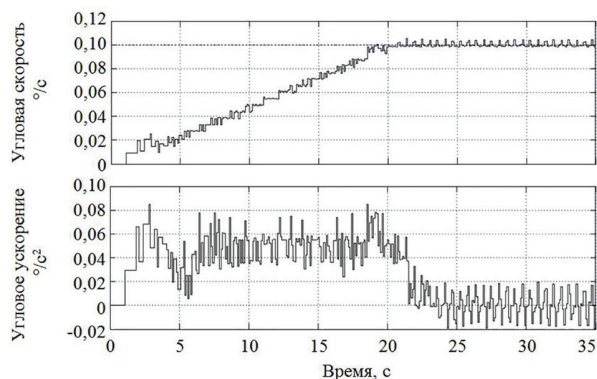


Рис. 6. Результаты моделирования работы ИЭП с НЗ и формирователем скорости задаваемой угловой скорости  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$

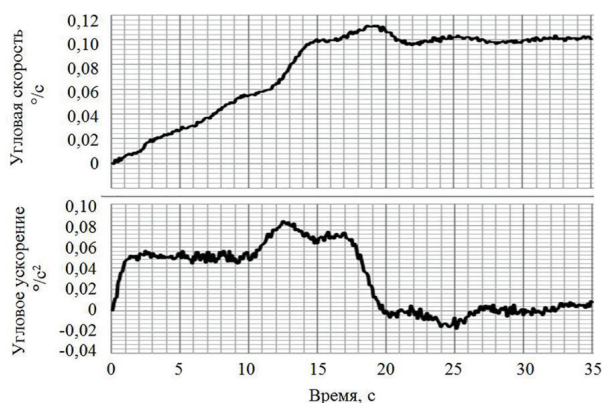


Рис. 7. Проверка реальным ИЭП УПСБ задаваемой угловой скорости  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$

НЗ описывается выражением:

$$N_{\text{НЗ}} = K_{\text{НЗ}} \cdot \text{sign}(N_{\text{в}}^{\text{расч}}),$$

где величина  $K_{\text{НЗ}}$  определяется при регулировке ИЭП. Эта величина не должна превышать величину момента сухого трения, но должна компенсировать большую его часть.

Результаты математического моделирования работы ИЭП с НЗ и формирователем задаваемой угловой скорости  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$  представлены на рис. 6. Видно, что время трогания ВВ заметно сократилось, а перерегулирование по ускорению уменьшилось.

**Результаты экспериментальной проверки опытного образца УПСБ.** Результаты экспериментальных исследований ИЭП УПСБ задаваемых скоростей вращения  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$  представлены на рис. 7. Видно, что ускорение, как и скорость, контролируется системой управления с достаточно высокой точностью. Результаты, представленные на рис. 6 и рис. 7, имеют высокую степень сходимости. Основное отличие заключается в отсутствии пульсаций углового ускорения, представленного на рис. 7, это связано с отсутствием помеховой составляющей в ДУ, по которому определялось угловое положение при экспериментальной проверке.

**Заключение.** В статье предложен способ построения системы управления ИЭП УПСБ. Суть способа заключается в поочередном двойном интегрировании заданного углового ускорения, с промежуточным ограничением угловой скорости вращения заданной величиной и регулировании

объектом управления по контуру угла выходного вала. Устройство математически описано и промоделировано в среде Matlab/Simulink. Моделирование было проведено, опираясь на работы [11–14].

Результаты моделирования и испытаний опытных образцов УПСБ показали эффективность принятых схемотехнических решений. Предложенная система управления ИЭП позволяет обеспечить точное управление угловой скоростью с управляемым значением углового ускорения в условиях действия неустойчивого момента сухого трения.

#### Библиографический список

1. Гушин В. Н. Основы устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
2. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. [и др.]. Бортовые системы управления космическими аппаратами / под ред. А. С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
3. Allegranza C., Gaillard L., Letty R. Le [et al.]. Actuators for Space Applications: State of the Art and New Technologies // ACTUATOR 2014. 14 Intern. Conf. on New Actuators. Bremen, Germany, 2014. P. 283–288.
4. Kumar A., Valarmathi M. High Precision Stepper Motor Controller Implementation on FPGA with GUI on LabVIEW // International Journal of Advanced Research. In Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2013. Vol. 2 (4). P. 1197–1202.
5. Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод гироина // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2016. С. 301–306.
6. Пересленгин Н. Г. Демпфирующие свойства электропривода в многомассовых системах с упругими связями // IX Всесоюзная конференция по проблемам автоматизированного электропривода: сб. науч. тр. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 82–89.
7. Ключев В. И. Теория электропривода. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
8. Садовников М. А. Измерение скорости движения силового электропривода с помощью оптических датчиков угла // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 52–57.
9. Джукич Д. Й., Якимовский Д. О., Положенцев Д. С. Организация систем управления низкоскоростных электроприводов // Завалишинские чтения'14: сб. докл. СПб.: Изд-во ГУАП, 2014. С. 139–141. ISBN 978-5-8088-0954-3.
10. Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 3. С. 103–108. DOI: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-103-108.
11. Nagorniy V., Aristov A. Mathematical simulation of the asynchronous electric drive of periodic movement // Proc. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 113. 01042. DOI: 10.1051/mateconf/201711301010.
12. Gasiyarov V. R., Radionov A. A., Maklakov A. S. Modelling and simulation of three level inverters for main drive of the plate mill rolling stand // Proc. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 45. 02001. DOI: 10.1051/mateconf/20164502001.
13. Zhang W., Xiao F., Qiao M. PMSM system controlled by SVM-DTC // Proc. MATEC Web of Conferences 2016. Vol. 55. 01007. DOI: 10.1051/mateconf/20165501007.
14. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с. ISBN 978-5-903383-39-9.

**ПОЛОЖЕНЦЕВ Дмитрий Сергеевич**, начальник сектора по разработке электроприводов Научно-исследовательского института командных приборов,

г. Санкт-Петербург; аспирант кафедры «Системы приводов, мехатроника и робототехника» Балтийского государственного технического университета (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова), г. Санкт-Петербург; ассистент кафедры управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Адрес для переписки: pds6476564@yandex.ru

**ДЖУКИЧ Даниэл Йорданович**, инженер 1-й категории сектора по разработке электроприводов Научно-исследовательского института командных приборов, г. Санкт-Петербург; аспирант кафедры «Системы приводов, мехатроника и робототехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: ddi791@mail.ru

**ЗАХАРОВ Дмитрий Николаевич**, магистрант гр. И8М51 факультета информационных и управляющих систем БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: zacharov.dm1t@yandex.ru

#### Для цитирования

Положенцев Д. С., Джукич Д. Й., Захаров Д. Н. Система управления исполнительного электропривода устройства поворотного солнечной батареи космического аппарата // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 72–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-72-76.

Статья поступила в редакцию 26.06.2019 г.

© Д. С. Положенцев, Д. Й. Джукич, Д. Н. Захаров