

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ БЛОКОМ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Л. А. Макриденко, В. В. Некрасов

В рамках создания диссертационного исследования на тему: «Микроконтроллерная система управления двигателем-маховиком для высокودинамичных космических аппаратов» по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации» – выявлен недостаток в современной отечественной промышленности космического назначения – отсутствие технических и практических решений управления скоростью вращения ротора электромеханического блока двигателя-маховика для решения класса задач управления угловыми маневрами высокودинамичных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Для устранения данного недостатка создана методика оценки структурных характеристик системы управления электромеханическим блоком двигателя-маховика, включающая уточнение перечня и характеристик элементов данной системы и распределение между ними задач эффективного управления скоростью вращения ротора двигателя-маховика, а также выявление технических характеристик и требований к микроконтроллерной системе автоматического управления скоростью вращения ротора электромеханического блока двигателя-маховика для угловых маневров высокودинамичных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Отличительной особенностью методики, с одной стороны, является наличие интегральной оценки наиболее значимых характеристик управления электромеханического блока двигателя-маховика, а с другой стороны, – возможность раздельной оптимизации характеристик управления, что позволяет свести многокритериальную задачу проектирования к однокритериальной и тем самым сократить время проектирования.

Ключевые слова: методика оценки, двигатель-маховик, микроконтроллерная система управления, скорость вращения ротора, высокودинамичные космические аппараты, дистанционное зондирование Земли.

Введение в создание методики

В рамках создания диссертационного исследования на тему: «Микроконтроллерная система управления двигателем-маховиком для высокودинамичных космических аппаратов» по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации» – осуществлен анализ современных отечественных тенденций по созданию систем управления электромеханическим блоком (ЭМБ) двигателя-маховика (ДМ) для угловых маневров высокودинамичных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Из анализа отечественных (в том числе, диссертационных исследований: А. И. Каримова [1], Н. Н. Балковского [2], О. Ю. Завьяловой [3], а также монографии Д. О. Якимовского, М. В. Буракова, А. С. Коновалова [4]) и зарубежных трудов ученых по созданию систем ориентации и стабилизации КА [5 – 10] выявлен существующий недостаток в современной отечественной космической промышленности – отсутствии технических и практических решений эффективного автоматического управления скоростью вращения ротора (ω) ЭМБ ДМ для решения класса задач управления угловыми маневрами высокودинамичных КА ДЗЗ. Для устранения данного недостатка принято решение о создании методики оценки структурных характеристик системы управления ЭМБ ДМ. Применение такой методики позволяет

уточнить перечень и характеристики элементов системы управления ДМ для организации эффективного управления ω ЭМБ ДМ, а также – распределить между элементами данной системы задачи эффективного управления, выявить технические характеристики и требования к микроконтроллерной (МК) системе автоматического управления ω ЭМБ ДМ для угловых маневров высокودинамичных КА ДЗЗ. Отметим, что данная методика оценки является частью создаваемой в диссертационном исследовании методики проектирования МК-системы автоматического управления ω ЭМБ ДМ для угловых маневров высокودинамичных КА ДЗЗ.

Создание методики оценки

Анализ структурных схем систем космического комплекса, ракетно-космического комплекса, КА ДЗЗ, ориентации и стабилизации различных КА позволил выявить элемент ДМ [11], как исполнительный орган системы ориентации и стабилизации КА ДЗЗ [12].

Под действием управляющего момента $M_{КА}$ [13] КА с моментом инерции $J_{КА}$ меняет свое угловое положение в соответствии с уравнением:

$$M_{КА} = J_{КА} d\omega_{КА} / dt,$$

где $\omega_{КА}$ – угловая скорость вращения КА ($d\omega_{КА}$ – значение изменения $\omega_{КА}$); dt – значение изменения времени.

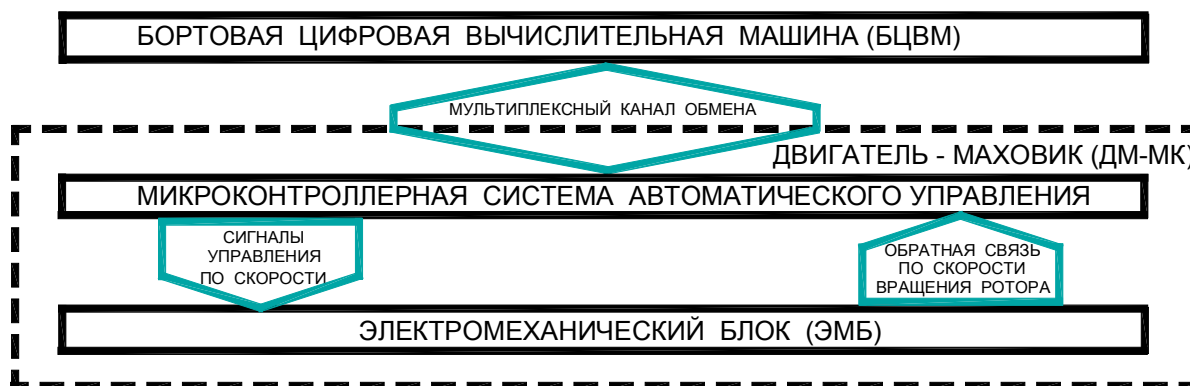


Рис. 1. Обобщенная структура комплекса технических средств системы управления скоростью вращения ротора электромеханического блока двигателя-маховика

ДМ – электродвигатель специальной конструкции, у которого инерционная нагрузка – маховое колесо (маховик) используется для формирования момента M_y , регулированием которого осуществляется управление моментом $M_{КА}$, прикладываемого к корпусу КА:

$$M_{КА} = -M_y.$$

Момент M_y описывается следующим уравнением:

$$M_y = Jd\omega/dt, \tag{1}$$

где J – момент инерции вращения маховика; ω – скорость вращения ротора ЭМБ ДМ относительно корпуса КА.

Отметим, что формирование значения момента M_y осуществляется значениями электромагнитного момента M_3 и момента сопротивления M_c :

$$M_y = M_3 - M_c.$$

Далее представлены основные пункты и результаты применения созданной методики оценки структурных характеристик системы управления ЭМБ ДМ.

1. Выбрана структура комплекса технических средств системы управления ω ЭМБ ДМ (рис. 1).

Выбор данной структуры комплекса технических средств базируется на классической структуре системы управления заданным крутящим моментом ЭМБ ДМ [14 – 17]. За основу взят типоразмерный ряд ЭМБ ДМ, где применена аналоговая схема ДМ (рис. 2), разработанного и выпускаемого в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». В качестве примера изделия из данного типоразмерного ряда может быть ДМ типа ДМ20-250, маховичный электропри-

вод которого выполнен на основе бесконтактного электродвигателя постоянного тока (рис. 3). В бесконтактном электродвигателе постоянного тока задача управления вращающим моментом сводится к управлению током в якорной обмотке, поскольку магнитный поток, возбуждаемый магнитами, практически постоянен [18, 19]. В схеме рассматриваемого ЭМБ ДМ управление уровнем тока в обмотке двигателя осуществляется регулятором тока, работающим в режиме широтно-импульсной модуляции по внешнему управляющему сигналу U_c .



Рис. 2. Двигатели-маховики разработки и производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

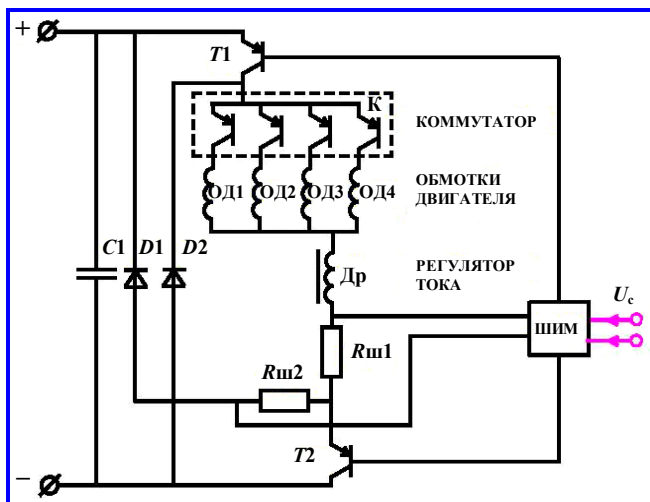


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема бесконтактного электродвигателя постоянного тока ДМ20-250

В рамках настоящего исследования предлагается осуществить модернизацию схемы классического ДМ с помощью замены внутренней аналоговой системы управления ЭМБ ДМ на цифровую МК-систему автоматического управления с высокоточной обратной связью по ω (ДМ-МК). Управление ДМ-МК, как исполнительным органом системы ориентации и стабилизации высокодинамичного КА ДЗЗ, осуществляется через бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ) (см. рис. 1). Анализируя управляющие сигналы с БЦВМ и информационные сигналы с высокоточного опто-электрического датчика ω ЭМБ [20, 21], МК-система управления [22, 23] формирует необходимый управляющий сигнал U_c , пропорционально которому ЭМБ создает M_y , воздействующий на КА ДЗЗ.

В режиме управления ω ДМ-МК значение M_y (1) приведено под общие единицы и имеет следующий вид:

$$M_y = J2\pi/60d\omega/dt, \quad (2)$$

где π – число Пи (математическая константа).

2. Определены следующие задачи для эффективного управления ω из оценки структурных характеристик элемента БЦВМ:

- требование от ДМ-МК возможности создания различного значения M_y за согласованный такт времени dt (отметим, что БЦВМ централизовано контролирует ограничение значения M_y для разных типов угловых маневров высокодинамичных КА ДЗЗ и при необходимости осуществляет централизованное усреднение значения M_y);

- контроль результатов обработки функцией управления ДМ-МК затребованного ранее значения M_y .

3. Определена следующая задача для эффективного управления ω из оценки структурных характеристик элемента мультиплексного канала обмена – передача частного перечня сигналов взаимодействия с ДМ-МК по выбранному интерфейсу связи (такими как ГОСТ Р 52070.2003 [24], Space Wire [25], RS-485 [26], RS-232 [27] и др.), в соответствии с согласованным протоколом.

4. Определены следующие задачи для эффективного управления ω из оценки структурных характеристик элемента ЭМБ:

- формирование значения M_y согласно управляющей функции от МК-системы управления;

- формирование информации для МК-системы о ω .

5. Определены следующие задачи для эффективного управления ω из оценки структурных характеристик элемента МК-системы автоматического управления ДМ-МК:

- обеспечение приема и обработки информации входных переменных (значения M_y за согласован-

ный такт времени dt) для функции МК-системы управления ДМ-МК от БЦВМ (принятая информация от БЦВМ преобразуется в алгоритмах программного обеспечения в соответствующий вид, корректно воспринимаемый алгоритмическим математическим обеспечением МК-системы автоматического управления ДМ-МК;

- формирование функции управления ЭМБ [28 – 30], в котором реализуется выполнение сложных математических вычислений (включающих такие операции как интегрирование, дифференцирование и др.), данные математические вычисления обеспечиваются частными алгоритмами программного обеспечения, разработанными и интегрированными в узел схемы МК-системы автоматического управления, созданными в соответствии с частными техническими характеристиками примененного типа ЭМБ ДМ-МК, порядка обмена с БЦВМ и частным техническим заданием на ДМ-МК;

- формирование контрольной информации для БЦВМ о работе элементов системы ДМ-МК, в соответствии с протоколом информационного обмена, согласованному лицами принимающими решения;

- нейтрализация M_c (уход от централизованного управления БЦВМ в данной задаче);

- идеология децентрализованного относительно БЦВМ определения и контроля истинного значения ω ДМ-МК (корректирующий контроль значения ω с учетом влияния ускорения).

6. Предложена концепция создания M_y исполнительным органом системы ориентации и стабилизации высокодинамичных КА ДЗЗ, определяющаяся двумя значащими факторами для наведения трасс съемки с КА ДЗЗ на определенные районы для проведения частых наблюдений (например, во время стихийных бедствий, возгораний и т. д.):

- оперативностью выполнения угловых маневров КА ДЗЗ;

- точностью обеспечения требований угловых маневров КА ДЗЗ.

КА ДЗЗ для соответствия высокому качественному уровню, закладываемому в предложенную концепцию, должны обладать целым рядом особенностей структурно-функционального построения и конструкции. Для того чтобы получить необходимую географическую привязку различных измерений проводимых КА ДЗЗ (таких как спектральная измерительная информация), а также обеспечить минимальные искажения получаемых изображений (таких как изображения подстилающей поверхности Земли в различных областях спектра электромагнитных волн), КА ДЗЗ должны иметь высокую точность ориентации в орбитальной системе координат и стабилизации собственных угло-

вых скоростей аппарата вокруг центра масс. Точность ориентации и стабилизации КА, то есть точность углового маневра КА ДЗЗ отработки системой ориентации и стабилизации, должна быть тем выше, чем выше пространственная разрешающая способность аппаратуры дистанционного зондирования и требования географической привязки. Особое внимание должно быть уделено динамическим характеристикам КА ДЗЗ с тем, чтобы не допускать некомпенсированных возмущающих моментов при съемке или измерениях.

Исполнение отработки данных факторов осуществляется комплексом технических средств системы управления ЭМБ ДМ.

По итогам формулирования концепции предложен интегральный весовой показатель эффективного управления для МК-системы автоматического управления ЭМБ ДМ-МК высокодинамичных КА ДЗЗ.

Анализ влияния значащих факторов концепции создания M_y на эффективность отработки угловых маневров высокодинамичных КА ДЗЗ позволил разработать интегральный весовой показатель с помощью суммирования показателей (метод сумм):

$$K = \sum_{i=1}^m a_i,$$

где K – интегральный показатель (если $K = 1 \pm \sigma$ – оптимальная эффективность управления, если $K < 1 \pm \sigma$ или $K > 1 \pm \sigma$ требуется адаптивная корректировка МК-системой управления, где σ – допуск); m – количество показателей; a_i – значение показателей.

Данный интегральный весовой показатель включает следующие частные показатели эффективности для МК-системы автоматического управления ЭМБ ДМ-МК высокодинамичных КА ДЗЗ:

- показатель оперативности отработки требуемого значения ω (ω_{req}) ЭМБ ДМ-МК;
- показатель точности отработки ω_{req} ЭМБ ДМ-МК.

Так как значимость каждого частного показателя в зависимости от случая динамического процесса управления может меняться, то МК-системой управления адаптивно рассчитываются соответствующие частные весовые коэффициенты a :

$$a_1 = a_o K_o,$$

где a_1 – значение весового показателя с индексом № 1; a_o – значение показателя оперативности; K_o – значение весового коэффициента оперативности;

$$a_2 = a_t K_t,$$

где a_2 – значение весового показателя с индексом № 2; a_t – значение показателя точности; K_t – значение весового коэффициента точности.

Отметим, что данные веса показателей – относительные, расчет которых производится путем деления одного абсолютного параметра на другой, т. е. значение в числителе текущее (сравниваемое), а показатель в знаменателе – основная база сравнения (размерность представлена в процентах):

$$K_o = E_n / \Delta E_m 100\%, \quad (3)$$

где E_n – нейтрализуемое значение ошибки ω (E) за выбранный такт времени (dt); ΔE_m – максимально возможное значение E для нейтрализации системой ДМ-МК за dt ;

$$K_t = (\Delta E_m - E_n) / \Delta E_m 100\%, \quad (4)$$

где K_t – значение весового коэффициента точности.

В процессе диссертационного исследования создана математическая модель процесса автоматического управления ЭМБ ДМ-МК для угловых маневров высокодинамичных КА ДЗЗ [28 – 30], отличающаяся наличием двух компонентов, первый из которых является графовой моделью, а второй – аналитической моделью автоматического управления, что позволяет формализовать и оптимизировать целевую функцию автоматического управления ЭМБ ДМ-МК и тем самым обеспечить работоспособность системы в целом на этапе проектирования. На основании созданной математической модели [30] методом декомпозиции определяются слагаемые этапы необходимой функции управления (рис. 4).

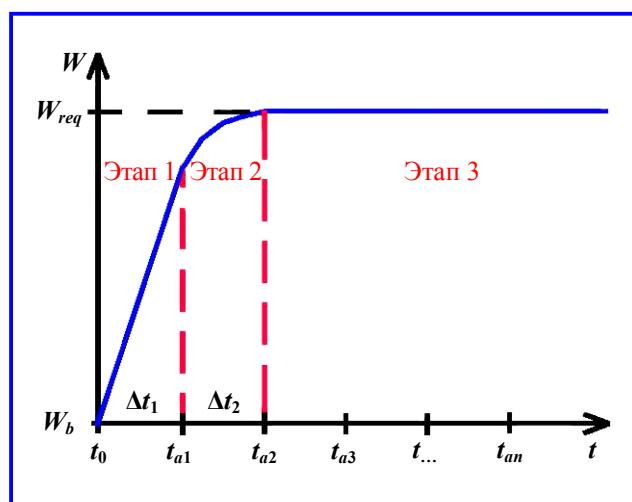


Рис. 4. Декомпозиционные этапы выхода и стабилизации новой ω_{req} электромеханического блока с двигателем-маховиком ДМ-МК для угловых маневров высокодинамичных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Исходя из анализа данных слагаемых этапов, представлены условия и расчет весовых коэффициентов частных показателей эффективности декомпозиционных этапов выхода и стабилизации новой ω_{req} ЭМБ ДМ-МК (табл. 1), требующиеся для создания необходимой функции управления.

Из созданной методики оценки определены основные технические характеристики и требования устойчивости значения ω ДМ-МК, необходимые для проведения диссертационного исследования: максимальное формируемое ЭМБ значение M_y ; момент инерции J , минимальное значение шага дискретности управляющего сигнала с МК-системы управления U_c ; технические характеристики обратной связи по ω , информационных и управляющих сигналов взаимодействия ДМ-МК с БЦВМ по мультиплексному каналу обмена; а также требования по устойчивости, т. е. к допустимым отклонениям ω при различных режимах отработки ω_{req} ЭМБ. Построение исполнительных органов систе-

мы ориентации и стабилизации для высокодинамичных КА ДЗЗ базируется на определении основных элементов комплекса технических средств системы управления ω ДМ-МК и связях между ними, необходимых для обеспечения качества исследуемого объекта, МК-системы автоматического управления ω ЭМБ ДМ-МК (см. рис. 1). Проектирование нового ДМ-МК требует реализации ряда необходимых этапов, составляющих общее время на разработку изделия в целом (табл. 2). Отметим, что проектирование МК-системы автоматического управления ω ЭМБ ДМ-МК для угловых маневров высокодинамичных КА ДЗЗ включает в себя выполнение задач как аппаратной, так и программной составляющих. Отметим, что в программной составляющей закладывается оптимальная целевая функция управления согласно выявленному интегральному весовому показателю эффективности управления. Данный этап составляет порядка 30% от общего времени проектирования нового ДМ-МК.

Таблица 1

Условия и расчет весовых коэффициентов частных показателей эффективности декомпозиционных этапов выхода и стабилизации новой ω_{req} ЭМБ ДМ-МК

	Этап 1	Этап 2	Этап 3
Условия декомпозиционного этапа	ω_{req} – новое значение от БЦВМ; $E > \Delta E_m$	ω_{req} – новое значение от БЦВМ; $E \leq \Delta E_m$	ω_{req} – стабилизируемое значение; $-\sigma \leq E \leq \sigma$
Нормировка значений K_o и K_T частных показателей, в %	$K_o = 100\%$, согласно (3); $K_T = 0\%$, согласно (4)	K_o см. (3); K_T см. (4)	K_o см. (3); K_T см. (4)

Таблица 2

Обобщенный перечень этапов проектирования нового ДМ-МК

№	Наименование основного этапа	Сроки (% от общего времени проектирования)
1	Оценка необходимой архитектуры, компонентов, интерфейсов и других характеристик создаваемой системы нового ДМ-МК	10%
2	Проектирование ЭМБ с высокоточной обратной связью по ω	30%
3	Проектирование БЦВМ, включающее реализацию основных задач для БЦВМ	30%
4	Проектирование МК-системы автоматического управления ω ЭМБ ДМ-МК для угловых маневров высокодинамичных КА ДЗЗ	30%

Заключение по созданию методики оценки

Создана методика оценки структурных характеристик системы управления ЭМБ ДМ-МК, включающая уточнение перечня и характеристик элементов данной системы и распределение между ними задач эффективного управления ω ДМ-МК, а также выявление технических характеристик и требований к МК-системе автоматического управления ω ЭМБ ДМ-МК для угловых маневров высокодинамичных КА ДЗЗ. Отличительной особенностью методики, с одной стороны, является наличие интегральной оценки наиболее значимых характеристик управления ЭМБ ДМ-МК, а с другой стороны, – возможность раздельной оптимизации характеристик управления, что позволяет свести многокритериальную задачу проектирования к однокритериальной и тем самым создать унифицированную МК-систему управления ω ЭМБ ДМ-МК для высокодинамичных КА ДЗЗ, что обеспечивает выигрыш при проектировании нового ДМ-МК в виде сокращения времени порядка на 30% (рис. 5).

Отметим, что созданное программное обеспечение для МК-системы, в которое алгоритмически заложена оптимальная целевая функция управления ω ЭМБ ДМ-МК (созданная с учетом оценки интегрального весового показателя настоящего исследования), позволило на прототипе ДМ-МК (рис. 6) обеспечить эффективное управление по ω (рис. 7) для трех декомпозиционных этапов (см. рис. 4).

В настоящее время созданная методика оценки апробирована в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и внедрена в две работы, ведущиеся на предприятии.

Автор выражает признательность сотрудникам АО «Корпорация «ВНИИЭМ»: А. П. Сарычеву, А. С. Абдурагимову, А. В. Рогозе, С. В. Медушеву, М. Ю. Щетинину, В. К. Кузьмину, Р. С. Городецкому, В. К. Кубраку, А. С. Медушеву, И. В. Соколунину – за возможность создания и содействие в отработке унифицированной микроконтроллерной системы автоматического управления скоростью вращения ротора электромеханического

блока на образцах двигателей-маховиков, разработанных и выпускаемых АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

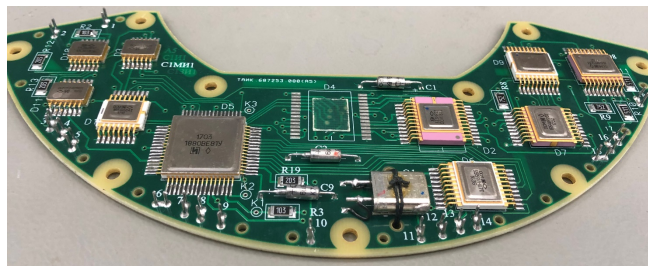


Рис. 5. Прототип платы унифицированной микроконтроллерной системы управления скоростью вращения ротора электромеханического блока двигателя-маховика ДМ-МК

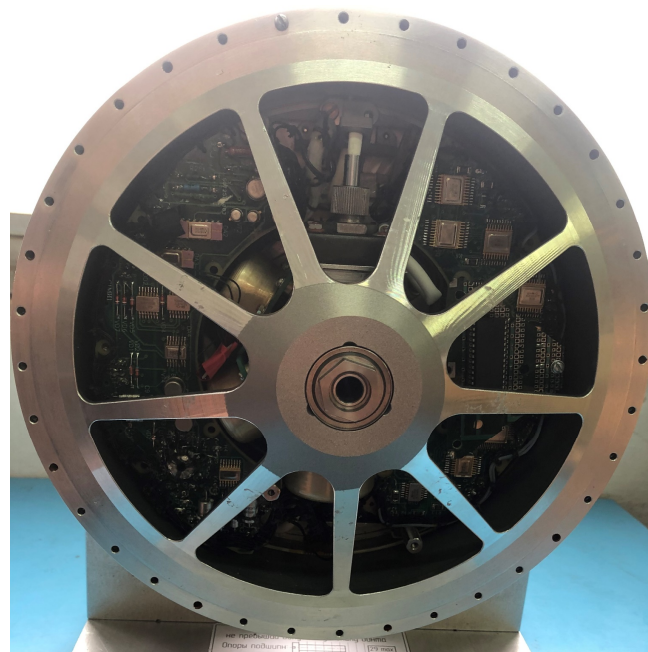


Рис. 6. Прототип двигателя-маховика ДМ-МК (без защитного кожуха), установленный на кронштейне

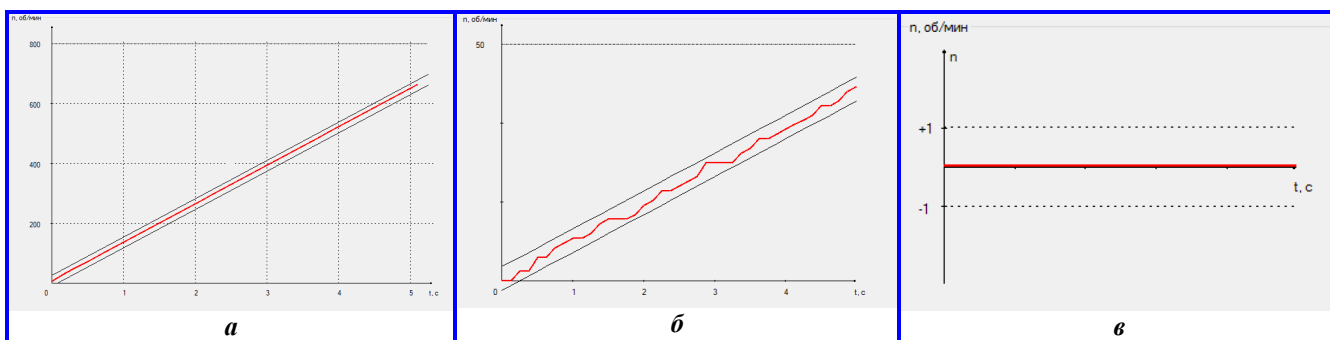


Рис. 7. Соответствие угловой скорости вращения ротора электромеханического блока прототипа двигателя-маховика ДМ-МК допускам для декомпозиционных этапов: а – 1; б – 2; в – 3

Литература

1. Каримов А. И. Автоматизированное рабочее место проектировщика встраиваемых систем командных приборов : специальность 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (промышленность)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каримов Артур Искандарович. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 177 с.
2. Балковой Н. Н. Разработка и исследование системы управления динамическим моментом двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Балковой Николай Николаевич. – Томск : ФГБОУВО «Томский ГУ систем управления и радиоэлектроники», ОАО «Научно-производственный центр «Полус», 2018. – 228 с.
3. Завьялова О. Ю. Разработка и исследование высокоточных регуляторов электромеханических исполнительных органов систем ориентации и стабилизации космического аппарата : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Завьялова Ольга Юрьевна. – Томск : ФГБОУВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ОАО «Научно-производственный центр «Полус», 2013. – 152 с.
4. Якимовский Д. О. [и др.] Управление ускорением двигателя-маховика космического аппарата : монография / Д. О. Якимовский, М. В. Бураков, А. С. Коновалов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. – 152 с.
5. Characterization of CubeSat Reaction Wheel Assemblies / J. Shields, C. Pong, K. Lo [et al.] // JoSS. – 2017. – Vol. 6. – No. 1. – P. 565 – 580.
6. A newly discovered branch of the fault tree explaining systemic reaction wheel failures and anomalies / W. Bialke, E. Hansell // Proc. «ESMATS 2017», 20 – 22 September 2017. – U.K., Hatfield : Univ. of Hertfordshire, 2017. – URL : <http://esmats.eu/esmatspapers/pastpapers/pdfs/2017/bialke.pdf>.
7. Comparison of Control Moment Gyros and Reaction Wheels for Small Earth-Observing Satellites / R. Votel, D. Sinclair // 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites – Logan, Utah, USA, 2012. – URL : <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1080&context=smallsat> (дата обращения: 14.06.2021).
8. Development and validation of reaction wheel disturbance models: empirical model / R. A. Masterson, D. W. Miller, R. L. Grogan // Journal of Sound and Vibration (2002). – Cambridge, USA, 2001. – 249 (3). – P. 575 – 598. – DOI : 10.1006/jsvi.2001.3868. – URL : <http://www.idealibrary.com>.
9. Numerical Study on a Reaction Wheel and Wheel-Disturbance Modeling / D.-K. Kim, S.-H. Oh, K.-L. Yong [et al.] // Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences. – 2010. – 38(7). – P. 702 – 708. – DOI : 10.5139/JKSAS.2010.38.7.702.
10. Development of Integrated Simulation Tool for Jitter Analysis / D.-O. Lee, J.-S. Yoon, J.-H. Han // Technical Paper Int'l J. of Aeronautical & Space Sci ; Republic of Korea. – 2012. – 13(1). – P. 64 – 73. – DOI : 10.5139/IJASS.2012.13.1.64.
11. Универсальная методология микроконтроллерной системы управления скоростью вращения ротора двигателя-маховика для высокодинамичных космических аппаратов / В. В. Некрасов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 177. – № 4. – С. 26 – 38.
12. Космические системы, комплексы и аппараты дистанционного зондирования разработки АО «Корпорация «ВНИИЭМ» : [в 2 томах] / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов, В. П. Ходненко. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. Т. 1 : Главы 1–6. – 336 с. Т. 2 : Главы 7–11. – 332 с.
13. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов / В. Н. Васильев. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
14. Бесконтактный электродвигатель постоянного тока со стабилизированным вращающим моментом / В. Н. Кузьмин, Г. А. Клевцов // Труды ВНИИЭМ. – Москва, 1976. – Т. 44. – С. 47 – 55.
15. Моментные характеристики избыточной системы электродвигателей-маховиков / А. Д. Беленький, В. Н. Васильев, В. В. Каверин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 107. – С. 7 – 10.
16. Управление минимально избыточной системой электродвигателей-маховиков / А. Д. Беленький, В. Н. Васильев // Известия РАН, МТТ. – Москва, 1996. – № 2. – С. 75 – 81.
17. Коэффициент использования кинетического момента в избыточных системах электродвигателей-маховиков / А. Д. Беленький, В. Н. Васильев, М. Е. Семенов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 108. – С. 29 – 34.
18. Анучин А.С. Системы управления электроприводами / А. С. Анучин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с. : ил.
19. Повышение точности управления динамическим моментом двигателя-маховика / О. Ю. Завьялова, Ю. М. Казанцев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012. – Т. 127. – С. 39 – 43.
20. Метод увеличения точности измерения частоты вращения ротора двигателя-маховика / Д. С. Науменко // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 135. – С. 13 – 16.
21. Особенности цифрового управления ДМ АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для высокодинамичных КА / В. Д. Бабишин, Д. Ю. Дементьев, В. С. Мартынов [и др.] // Космическая техника и технологии – Королев, 2019. – № 2 (25). – С. 107 – 111.
22. Микроконтроллеры? Это же просто! : [в 4 томах] / А. В. Фрунзе, А. А. Фрунзе. – Москва : ООО «ИД СКИ-

МЕН», 2003. – 4 т. – Текст : непосредственный.

23. Тихомиров Э. Л. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ / Э. Л. Тихомиров, В. В. Васильев, Б. Г. Коровин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 320 с.

24. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 5 июня 2003 г. № 182-ст : введен впервые : дата введения 01.01.2004 / Разработан государственным научно-исследовательским институтом авиационных систем с участием Научно-исследовательского института стандартизации и унификации. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 23 [1] с.

25. ECSS-E-50-12A. Space Wire – links, nodes, routers and networks ; 24.01.2003 ; [На основе стандартов: IEEE 1355-1995, TIA/EIA-644 и IEEE 1596.3-1996] / European cooperation for space standardization. – Noordwijk, The Netherlands : ESA-ESTEC, 2003. – 124 p.

26. RS-485, EIA-485. ANSI TIA/EIA-485-A:1998 Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems ; разработан Electronic Industries Association и Telecommunications Industry Association.

27. RS-232, EIA232. Стандарт физического уровня для асинхронного интерфейса (UART): EIA/TIA-232E:1991.

28. Построение математической модели МК-системы управления ДМ в режиме заданной скорости / В. В. Некрасов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 171. – № 4. – С. 3 – 8.

29. Оптимизация математической модели МК-системы управления ДМ для высокодинамичных КА / В. В. Некрасов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 173. – № 6. – С. 33 – 40.

30. Построение с помощью графов математической модели МК-системы управления ДМ в режиме заданной скорости для высокодинамичных КА / В. В. Некрасов // Космическая техника и технологии. – Королев, 2020 – № 1 (28). – С. 126 – 134.

Поступила в редакцию 14.01.2022

Леонид Алексеевич Макриденко, доктор технических наук, заместитель генерального директора – генеральный конструктор, т. (495) 365-56-10, e-mail: vniiem@orc.ru.

Владимир Викторович Некрасов, ведущий инженер, аспирант, т. (495) 366-20-56, e-mail: vvv17@list.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

METHOD FOR EVALUATING THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE CONTROL SYSTEM OF REACTION WHEEL ELECTROMECHANICAL UNIT TO ORGANIZE EFFICIENT CONTROL OF HIGHLY DYNAMIC SPACECRAFTS OF REMOTE EARTH SENSING

L. A. Makridenko, V. V. Nekrasov

As part of the dissertation research on the: 'Microcontroller control system for reaction wheel for highly dynamic spacecraft' in the specialty 2.3.1 'System analysis, control and information processing' – an issue in the modern space industry was revealed. It is a lack of technical and practical control solutions of the rotor speed rotation of the electromechanical unit of the reaction wheel for solving a class of objectives of controlling the angular actions of highly dynamic spacecraft for Earth remote sensing. To eliminate this issue, a method for assessing the structural characteristics of the control system for the electromechanical unit of the reaction wheel, including clarifying the list and characteristics of the elements of this system and distributing between them the objectives of effective control of the rotation speed of the reaction wheel rotor, as well as identifying the technical characteristics and requirements for the microcontroller system of automatic speed control of the rotor of the electromechanical unit of the reaction wheel for angular actions of highly dynamic spacecraft for Earth remote sensing was developed. A distinctive feature of the technique, on the one hand, is the presence of an integral assessment of the most significant control characteristics of the electromechanical unit of the reaction wheel, and on the other hand, the possibility of separate optimization of control characteristics that allows reducing the multi-criteria design issue to a single-criteria one and thereby reducing the design time.

Keywords: evaluation method, reaction wheel, microcontroller control system, rotor rotation speed, highly dynamic spacecrafts, Earth remote sensing.

Reference

1. Karimov A. I. Automated workstation for the designer of embedded systems of command devices : specialty 05.13.12 'Design automation systems (industry)' : thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Karimov Artur Iskandarovich. – St. Petersburg : SPETU ETU 'LETI', 2017. – 177 p.
2. Balkovoi N. N. Development and research of control system for dynamic torque of reaction wheel of spacecraft attitude and stabilization control system : specialty 05.09.03 'Electrotechnical complexes and systems' : thesis for the degree of

- Candidate of Technical Sciences / Balkovoi Nikolai Nikolaevich. – Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radio electronics, JSC Research and Production Center ‘Polyus’, 2018. – 228 p.
3. Zavialova O. Iu. Development and research of high-precision regulators of electromechanical actuators of spacecraft attitude and stabilization control system: thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Zavialova Olga Iurevna. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University, JSC Research and Production Center ‘Polyus’, 2013. – 152 p.
 4. Iakimovskii D. O. [et al.] Spacecraft reaction wheel acceleration control: monograph / D. O. Iakimovskii, M. V. Burakov, A. S. Kononov. – St. Petersburg : Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2018. – 152 p.
 5. Characterization of CubeSat Reaction Wheel Assemblies / J. Shields, C. Pong, K. Lo [et al.] // JoSS. – 2017. – Vol. 6. – No. 1. – P. 565 – 580.
 6. A newly discovered branch of the fault tree explaining systemic reaction wheel failures and anomalies / W. Bialke, E. Hansell // Proc. «ESMATS 2017», 20 – 22 September 2017. – U.K., Hatfield : Univ. of Hertfordshire, 2017. – URL : <http://esматы.eu/esматыpapers/pastpapers/pdfs/2017/bialke.pdf> (дата обращения: 14.06.2021).
 7. Comparison of Control Moment Gyros and Reaction Wheels for Small Earth-Observing Satellites / R. Votel, D. Sinclair // 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites – Logan, Utah, USA, 2012. – URL : <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1080&context=smallsat>.
 8. Development and validation of reaction wheel disturbance models: empirical model / R. A. Masterson, D. W. Miller, R. L. Grogan // Journal of Sound and Vibration (2002). – Cambridge, USA, 2001. – 249 (3). – P. 575 – 598. – DOI : 10.1006/jsvi.2001.3868. – URL : <http://www.idealibrary.com> (дата обращения: 14.06.2021).
 9. Numerical Study on a Reaction Wheel and Wheel-Disturbance Modeling / D.-K. Kim, S.-H. Oh, K.-L. Yong [et al.] // Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences. – 2010. – 38(7). – P. 702 – 708. – DOI : 10.5139/JKSAS.2010.38.7.702.
 10. Development of Integrated Simulation Tool for Jitter Analysis / D.-O. Lee, J.-S. Yoon, J.-H. Han // Technical Paper Int’l J. of Aeronautical & Space Sci ; Republic of Korea. – 2012. – 13(1). – P. 64 – 73. – DOI : 10.5139/IJASS.2012.13.1.64.
 11. Universal methodology of microcontroller system for controlling speed of rotor rotation of reaction wheel for highly dynamic spacecraft / V. V. Nekrasov // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2020. – Vol. 177. – No. 4. – P. 26 – 38.
 12. Space systems, complexes and remote sensing spacecraft developed by VNIIEM Corporation JSC : [2 Volumes] / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, V. P. Khodnenko. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2018. Vol. 1 : Chapters 1– 6. – 336 p. Vol. 2 : Chapters 7– 11. – 332 p.
 13. Vasilev V. N. Spacecraft orientation systems / V. N. Vasilev. – Moscow : FSUE NPP VNIIEM, 2009. – 310 p.
 14. Non-contact DC motor with stabilized torque / V. N. Kuzmin, G. A. Klevtsov // VNIIEM proceedings. – Moscow, 1976. – Vol. 44. – P. 47 – 55.
 15. Torque characteristics of a redundant reaction wheel system / A. D. Belenkii, V. N. Vasilev, V. V. Kaverin [et al.] // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : FSUE NPP VNIIEM, 2008. – Vol. 107. – P. 7 – 10.
 16. Control of a minimum redundant system of electric reaction wheels / A. D. Belenkii, V. N. Vasilev // Bulletin of RAS, mechanics of solids. – Moscow, 1996. – No. 2. – P. 75 – 81.
 17. Torque Utilization Factor in Redundant Reaction Wheel Systems / A. D. Belenkii, V. N. Vasilev, M. E. Semenov // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : FSUE NPP VNIIEM, 2009. – Vol. 108. – P. 29 – 34.
 18. Anuchin A.S. Electric drive control systems / A. S. Anuchin. – Moscow : MAI Publishing House, 2015. – 373 p. : with illustrations.
 19. Improving accuracy of controlling dynamic moment of reaction wheel / O. Iu. Zavialova, Iu. M. Kazantsev // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2012. – Vol. 127. – P. 39 – 43.
 20. Method for increasing accuracy of measuring rotor speed of reaction wheel / D. S. Naumenko // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2013. – Vol. 135. – P. 13 – 16.
 21. Features of digital control of RM VNIIEM Corporation JSC for highly dynamic spacecraft / V. D. Babishin, D. Iu. Dementev, V. S. Martynov [et al.] // Space engineering and technologies – Korolev, 2019. – No. 2 (25). – P. 107 – 111.
 22. Microcontrollers? It's simple! [4 Volumes] / A. V. Frunze, A. A. Frunze. – Moscow : LLC SKIMED Publishing House 2003. – 4 vol. – Text.
 23. Tikhomirov E. L. Microprocessor control of electric drives of CNC machines / E. L. Tikhomirov, V. V. Vasilev, B. G. Korovin. – Moscow : Mashinostroenie, 1990. – 320 p.
 24. GOST R 52070-2003. Main serial interface of system of electronic modules. General requirements: state standard of the Russian Federation: official edition: approved and accepted by the Decree of the State Standard of Russia dated June 5, 2003 No. 182-st: introduced for the first time: introduction date 01.01.2004 / Developed by the State Research Institute of Aviation Systems with the participation of Scientific Research Institute for Standardization and Unification. – Moscow : IPC Publishing House of Standards, 2003. – 23 [1] p.
 25. ECSS-E-50-12A. Space Wire – links, nodes, routers and networks ; 24.01.2003 ; [На основе стандартов: IEEE 1355-1995, TIA/EIA-644 и IEEE 1596.3-1996] / European cooperation for space standardization. – Noordwijk, The Netherlands : ESA-ESTEC, 2003. – 124 p.

26. RS-485, EIA-485. ANSI TIA/EIA-485-A:1998 Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems; разработан Electronic Industries Association и Telecommunications Industry Association.
27. RS-232, EIA232. Physical layer standard for asynchronous interface (UART): EIA/TIA-232E:1991.
28. Construction of mathematical model of MC-control system of RM in the preset speed mode / V. V. Nekrasov // Matters of electromechanics. VNIEM proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2019. – Vol. 171. – No. 4. – P. 3 – 8.
29. Optimization of Mathematical Model of the MC-control System for Highly Dynamic Spacecraft / V. V. Nekrasov // Matters of electromechanics. VNIEM proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2019. – Vol. 173. – No. 6. – P. 33 – 40.
30. Construction using graphs of mathematical model of the MC-control system RM in the preset speed mode for highly dynamic spacecraft / V. V. Nekrasov // Space engineering and technologies. – Korolev, 2020 – No. 1 (28). – P. 126 – 134.

Leonid Alekseevich Makridenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Deputy Director General – General Designer, Chief Designer, tel. +7 (495) 365-56-10, e-mail: vniem@orc.ru.
Vladimir Viktorovich Nekrasov, Leading engineer, tel. +7 (495) 366-20-56, e-mail: vvv17@list.ru. (JC «VNIEM Corporation»).