

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА ДЛЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. В. Некрасов

**Создана универсальная методология микроконтроллерной системы управления скоростью вращения ротора двигателя-маховика для высокодинамичных космических аппаратов. Данная методология включила в себя комплекс различных методов, выполняющих различные задачи, такие как: нейтрализация значения ошибки скорости вращения ротора отличного от нуля; компенсация момента сопротивления для всего рабочего диапазона скоростей вращения ротора; управление двигателем-маховиком бортового комплекса управления космического аппарата и т. д. По своей структуре методология имеет два уровня: теоретический и эмпирический. По результатам натурных испытаний созданная методология управления внедрена в работы АО «Корпорация «ВНИИЭМ».**

**Ключевые слова:** двигатель-маховик, методология, методика, микроконтроллерная система управления, управление скоростью вращения ротора, высокодинамичные космические аппараты.

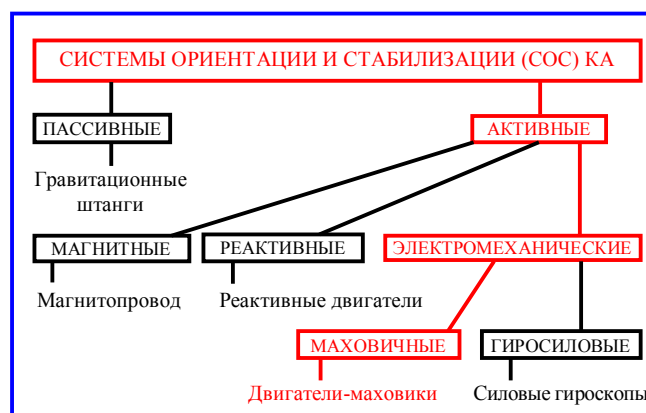
### Введение

Для расширения комплекса задач изучения Земли из космоса методами дистанционного зондирования, необходимо, чтобы космический аппарат (КА), как носитель различных приборов, в том числе специальной информационно-измерительной аппаратуры, удовлетворял широкому спектру требований, определяемых его назначением. Одним из таких требований является возможность оперативного и точного наведения трасс съемки с КА на определенные районы для проведения частых наблюдений (например, во время стихийных бедствий, при возгораниях и т. д.). Данные возможности обеспечиваются наличием систем ориентации и стабилизации (СОС) КА. Исполнительными органами (ИО) СОС КА за счет создаваемых управляющих моментов ( $M_y$ ), воздействующих на КА, обеспечиваются угловые маневры вращения вокруг центра масс КА и его стабилизация. Как вариант, в качестве ИО СОС КА (см. рис. 1), применяют двигатели-маховики (ДМ).

На фоне возрастающего интереса применения микро-, мини- и малых спутников в космонавтике [1, 2, 3] интерес к использованию ДМ не уменьшается, а требования к улучшениям технических характеристик только увеличиваются [4, 5].

С появлением радиационно стойкой микроконтроллерной (МК) техники появились новые возможности в управлении ДМ, а следовательно, и КА. В процессе диссертационного исследования на тему: «Микроконтроллерная система управления двигателем-маховиком для высокодинамичных космических аппаратов» – была произведена интеграция в схему ДМ МК-управления (ДМ-МК), которая позволила не только существенно увеличить качество ряда технических характеристик ДМ, но и пополнить ДМ

новыми функциональными возможностями, на базе которых реализована новая универсальная методология микроконтроллерной системы управления ДМ-МК для высокодинамичных КА. Данная методология включает высокоточное управление по кинетическому моменту ( $M_k$ ) ДМ. Величина  $M_k$  ДМ характеризуется значением массы вращения, распределением этой вращающейся массы относительно оси вращения и скоростью данного вращения. Так как значения массы и распределения ее относительно оси вращения обусловлено конструкцией применяемого ДМ, то значения этих величин в данной работе считаем константами, а созданную методологию – универсальной для применения в разных типах ДМ. Таким образом, методология управления по  $M_k$  предполагает МК-управление скоростью вращения ротора ДМ для высокодинамичных КА (данная терминология применена далее по тексту).



**Рис. 1. Структурная схема классификации СОС КА по способу создания управляющих моментов и типам используемых ИО**

Для расширения задач изучения Земли методами дистанционного зондирования необходимо, чтобы КА удовлетворял современным требованиям, одним из которых является оперативное и точное наведение трасс съемки. Общие принципы базируются на применении ДМ, как электромаховичных ИО СОС КА с соответствующими техническими особенностями создания таких систем управления с учетом теорий электрических машин и электропривода, теории автоматического управления и других примененных методов исследования. Данное управление предполагает отработку требуемых угловых маневров (крена, тангажа и рысканья) за минимальное время с высокоточной стабилизацией собственных угловых скоростей вокруг центра масс КА (рис. 2).

Управление скоростью вращения ротора ДМ предполагает исключение из функции управления бортового комплекса управления (БКУ) КА [6] контроля за значениями моментов сопротивления ( $M_c$ ) каждого ДМ системы ориентации и стабилизации КА (рис. 2).  $M_c$  обусловлен нелинейностью и может достигать во всем диапазоне скоростей вращения ротора ДМ за время эксплуатации изделия значений близких 50%, поэтому его исключение существенно влияет на упрощение функции управления, формируемой БКУ КА.

**Создание концептуальной модели и постановка решаемых ею задач**

Современный космический комплекс (КК) представляет собой совокупность наземных и космических средств, обеспечивающих решение целевых задач в космическом пространстве (рис. 3) [7].

Ракетно-космический комплекс (РКК) – это ракеты космического назначения (РКН) с техническими средствами и сооружениями для обеспечения подготовки и вывода космических средств для реализации их целевых задач (рис. 4) [8].

Для всех КА общей способностью является длительное самостоятельное функционирование в условиях космического пространства. Этого удастся добиться с помощью ряда обеспечивающих систем, таких как: ориентация в пространстве, энергосбережение, связь управления движением и т. д.

На примере КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) приводится типовая структурная схема КА (рис. 5) [7].

Система ориентации и стабилизации (рассмотрена на примере СОС КА «Канопус-В» № 6 [9]), в соответствии с алгоритмами, заложенными в ПО БКУ, по командам, получаемым с Земли, обеспечивает заданную стабилизацию и ориентацию КА в пространстве (рис. 6).

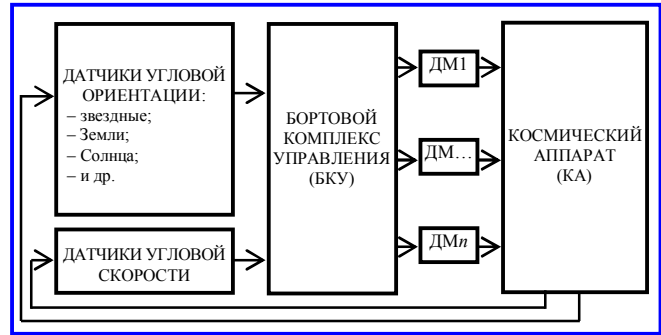


Рис. 2. Функциональная схема СОС КА с системой ДМ

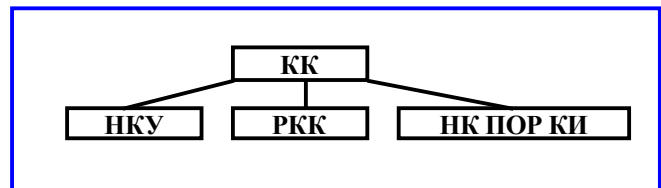


Рис. 3. Пример структурной схемы космического комплекса, где НКУ – наземный комплекс управления; НК ПОР КИ – наземный комплекс приема, обработки и распространения космической информации

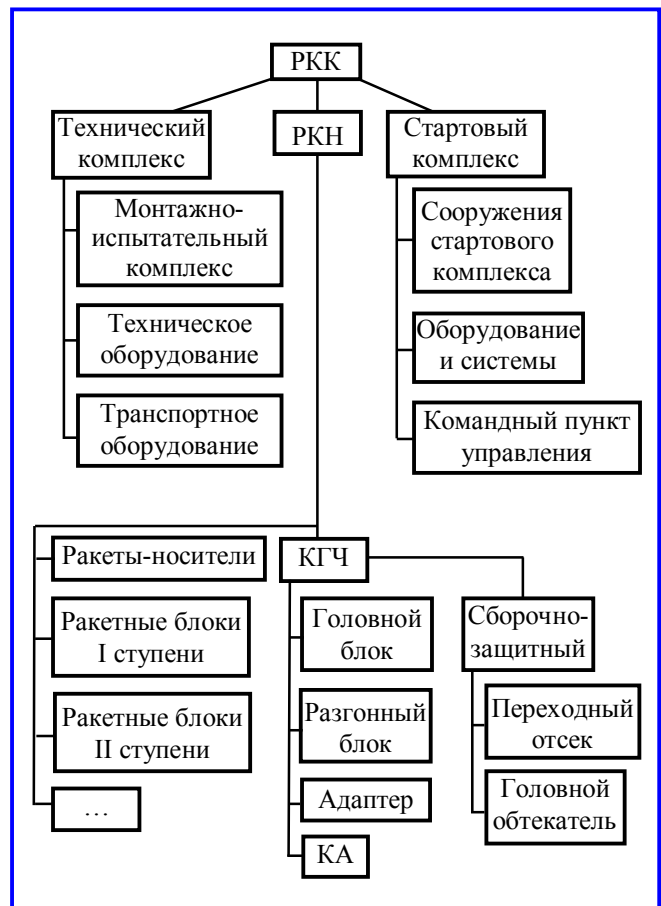


Рис. 4. Пример структурной схемы ракетно-космического комплекса (КГЧ – космическая головная часть)

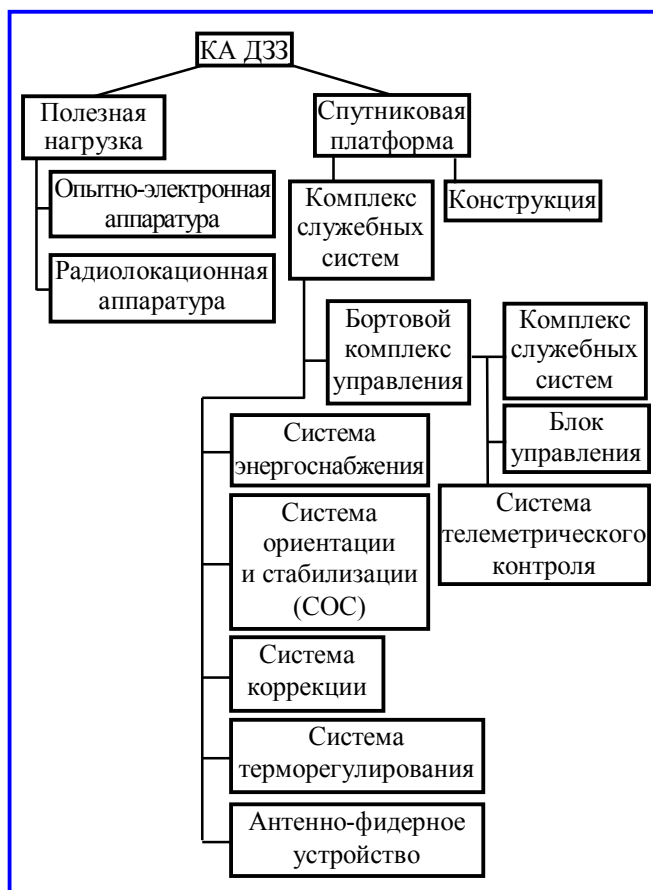


Рис. 5. Структурная схема КА ДЗЗ

В рамках создания диссертационной работы по специальности 05.13.01 (Системный анализ, управление и обработка информации) были рассмотрены структурные схемы космического комплекса (рис. 3), ракетно-космического комплекса (рис. 4), КА ДЗЗ (рис. 5), системы ориентации и стабилизации КА «Канопус-В» № 6 (рис. 6) и выделен объект исследования ДМ.

СОС КА ДЗЗ «Канопус-В» № 6 (рис. 6) обеспечивает следующие режимы управления КА:

- стабилизацию КА после отделения его от разгонного блока ракеты-носителя;
- ориентацию солнечных батарей КА на Солнце;
- грубую ориентацию КА в орбитальной системе координат;
- точную ориентацию и стабилизацию в целевой системе координат;
- программные повороты для перехода из одной целевой системы координат в другую;
- программное стабилизированное вращение КА в режиме калибровки целевой аппаратуры КА по Луне или звездам;
- программные развороты для обеспечения коррекции орбиты по наклонению и периоду при од-

нодвигательной корректирующей установке;

– стабилизацию углового положения КА при корректирующей двигательной установке.

Практически идентичные ИО СОС КА «Канопус-В» № 6 также применены в КА: серии «Канопус-В» (№ 1 [10], № 3, № 4 [11], № 5 [9], а также: «Канопус-В-ИК» [12], Белорусского КА ДЗЗ [13], «Ломоносов» [14] и некоторых других отечественных КА). Данные ДМ (рис. 6) были поставлены британской компанией Surrey Satellite Technology Limited (SSTL). Особенностью данных электромаховичных систем является большая функциональность, обеспечивающая возможность реализации управления КА на высокотехническом уровне, в том числе обеспечивающем высокоточное управление по кинетическому моменту в сравнении с известными СОС КА отечественного производства.

Исполнительными органами СОС КА («Метеор-М» № 1 [15], «Ресурс-01» [16, 17], «Электро» (GOMS) [18], «КОРОНАС-ФОТОН» [19], «Метеор-М» № 2 [20], «Университетский – Татьяна-2» [21] и некоторых других отечественных КА) являются комплекты ДМ (рис. 7) производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Управление ДМ данных комплектов осуществляется в режиме управления величиной крутящего момента. Методология управления имеет импульсный интерфейс. Контроль за линейностью формы характеристики  $M_y$  возложен на функцию управления БКУ КА, которая отслеживает угловые повороты КА и корректирует требуемый  $M_y$ , в зависимости от зафиксированного изменения значения  $M_c$  каждого ДМ. Такая методология управления формирует дополнительные задержки в сборе информации СОС о характеристиках отработки управляющих воздействий на КА, что негативно влияет на оперативность принятия решения по созданию ДМ нового управляющего воздействия, а также на точность ориентации и стабилизации угловой скорости КА.

Отметим, что применение таких систем, как СОС SSTL, требует их сопутствующей настройки и обработки сотрудниками SSTL. Несмотря на сопроводительную документацию, функции управления новых высокотехнических режимов (таких как высокоточное управление по кинетическому моменту) остаются «черным ящиком» и создателями не раскрываются.

Поэтому, оценив совместную работу АО «Корпорация «ВНИИЭМ» с британской компанией SSTL по совместному созданию СОС КА серии «Канопус-В» [9 – 13, 22, 23]; проанализировав доступную информацию производителей (АО «Научно-производственный центр «Полус» [24], АО «Научно-исследовательский институт

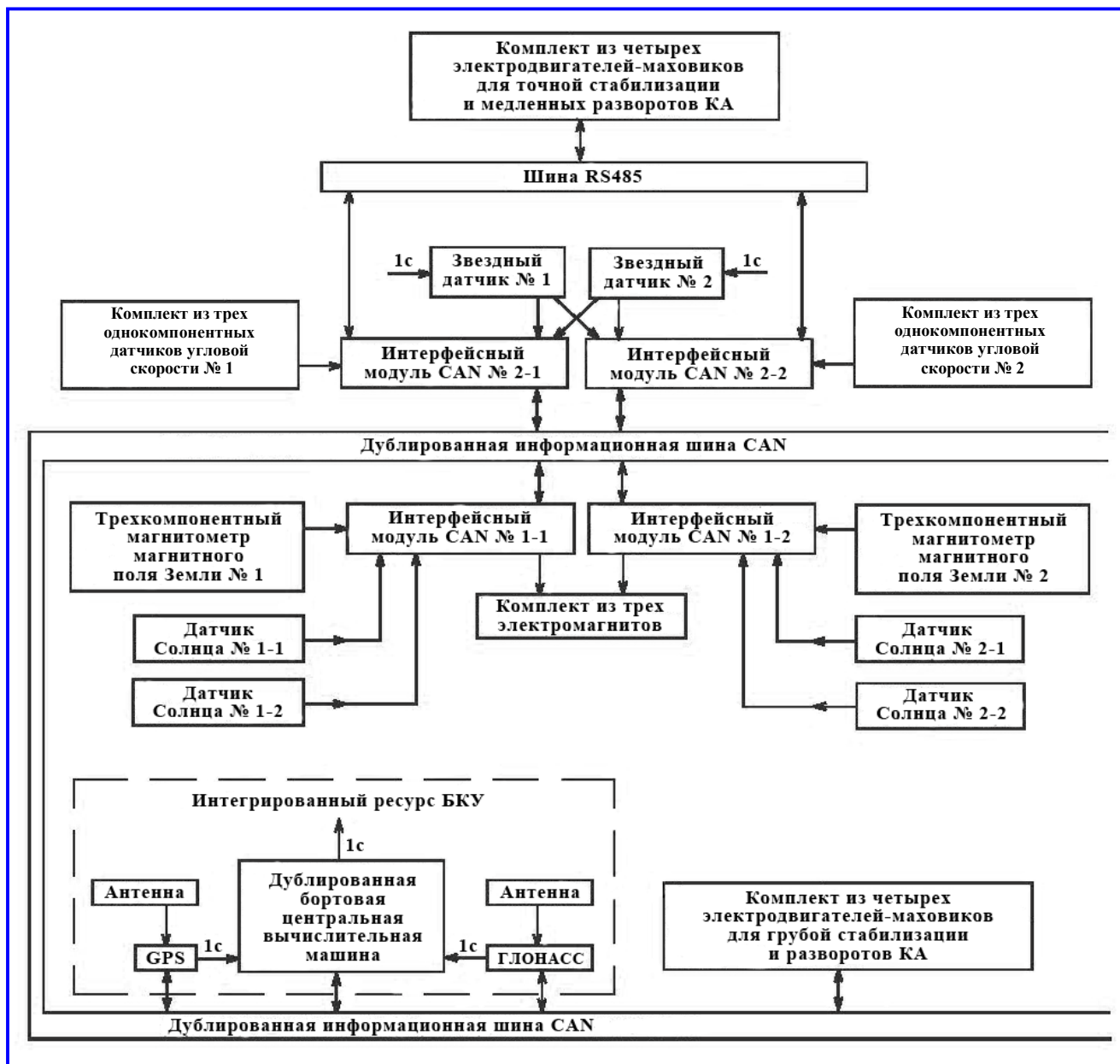


Рис. 6. Структурная схема ориентации и стабилизации КА «Канопус-В» № 6



Рис. 7. Двигатели-маховики АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

командных приборов», американской корпорации Honeywell и др.); взяв за основу накопленный опыт разработки ДМ в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» [7, 14, 15, 21, 25 – 28], было принято решение о со-

здании прототипа ДМ-МК (рис. 8). Это позволит решить такие задачи, как:

- разработка алгоритма управления прототипа ДМ-МК в режиме управления величиной крутящего момента;
- разработка ПО, позволяющего обеспечивать: прием и логическую обработку сигналов с электромеханического блока (ЭМБ), формирование сигналов управления ЭМБ, прием и логическую обработку сигналов с БКУ по мультиплексному каналу обмена (МКО) [29], формирование телеметрической информации для передачи по МКО в БКУ;
- разработка схемы МК-управления прототипа ДМ-МК с организацией обратной связи по скорости вращения ротора ДМ-МК.

За основу создания концептуальной модели прототипа ДМ-МК взята аналоговая схема ДМ, разработанного и выпускаемого АО «Корпорация «ВНИИЭМ», маховичный электропривод которого выполнен на основе бесконтактного электродвигателя постоянного тока (БДПТ) [30]. В БДПТ задача управления вращающим моментом сводится к управлению током в якорной обмотке, поскольку магнитный поток, возбуждаемый магнитами, практически постоянен [31]. На схеме управление уровнем тока в обмотке двигателя осуществляется регулятором тока, работающим в режиме широтно-импульсной модуляции по внешнему управляющему сигналу, формируемому микроконтроллерным модулем (МКМ) [32, 33] (рис. 9).

Для организации обратной связи по скорости вращения ротора ДМ-МК в схему ЭМБ введен оптоэлектрический датчик скорости [34], представляющий собой блок излучающих диодов и фотодиодов. Оптоэлектрический датчик формирует 1360 импульсов за оборот. Информация с датчика скорости для дальнейшей обработки поступает в МКМ (рис. 10).

МКМ разработан на базе применяемого в изделиях АО «Корпорация «ВНИИЭМ» унифицированного микроконтроллерного модуля управления для систем ориентации солнечных батарей (СОСБ) КА [35].

МКМ обеспечивает цифровое управление ДМ и выполняет задачи:

- приема и логической обработки сигналов контроля с ЭМБ;
- формирования сигналов управления ЭМБ;
- приема и логической обработки сигналов с БКУ КА по МКО [29];
- формирования телеметрической информации для передачи по МКО в БКУ КА.

Анализируя сигналы управления с БКУ КА и информационные сигналы с оптоэлектрического датчика скорости ЭМБ, МКМ формирует необходимое аналоговое управляющее напряжение ( $U_c$ ), пропорционально которому ЭМБ создает крутящий момент на валу ДМ-МК.

По итогам успешной экспериментальной проверки макета ДМ-МК на работоспособность в режиме управления величиной крутящего момента сформулирована научная задача.

### Формулировка научной задачи

Дано: примеры основных технических характеристик прототипа ДМ-МК (табл. 1) и требований к допустимому отклонению частоты вращения ротора

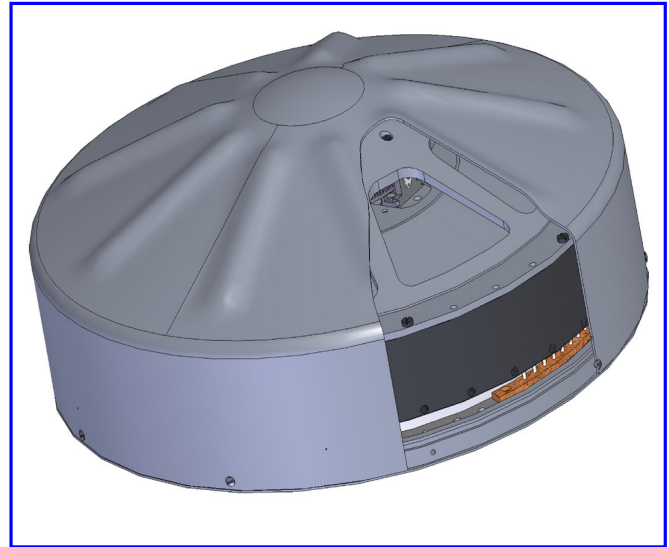


Рис. 8. Общий вид прототипа ДМ-МК

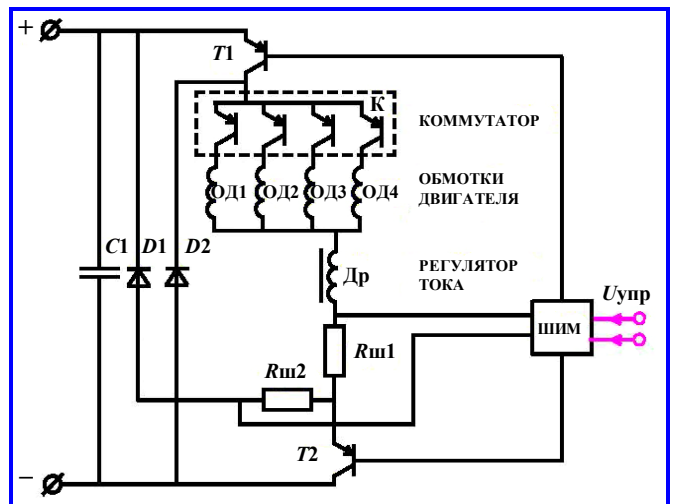


Рис. 9. Упрощенная принципиальная схема бесконтактного электродвигателя постоянного тока

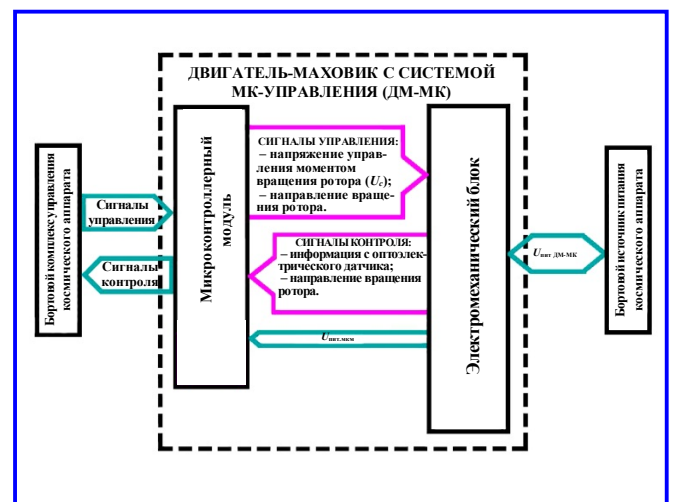


Рис. 10. Структурная блок-схема ДМ-МК

Таблица 1

## Основные технические характеристики ДМ-МК

Управляющий момент ( $M_v$ ), Н·м	1
Кинетический момент ( $M_k$ ), Н·м·с	$\pm 10$
Диапазон изменения частоты вращения, об/мин	$\pm 1360$
Максимальный потребляемый ток, А	10
Число импульсов на оборот ( $N_{i/rm}$ ), шт.	1360
Погрешность значения количества импульсов за оборот ( $N_e$ ), шт.	$\pm 1$
Время обновления информации о скорости вращения ротора, мс	не более 100
Масса, кг	8
Напряжение питания, В	24 ... 34
Тип семейства микроконтроллера	MCS-51
Дискретность управляющего аналогового сигнала $U_c$	4095
Такт общения ( $dt_{БКУ}$ ) с БКУ КА, мс	100
Срок службы, лет	не менее 12

Таблица 2

## Требования к допустимому отклонению частоты вращения ротора в режиме управления по скорости ДМ-МК

При неизменной заданной частоте (вариант А), об/мин	не более 1
При темпе изменения заданной частоты не более 1000 об/мин <sup>2</sup> (вариант В), об/мин	не более 2
При темпе изменения заданной частоты вращения в диапазоне от 1000 до 8000 об/мин <sup>2</sup> (вариант С), об/мин	не более 10

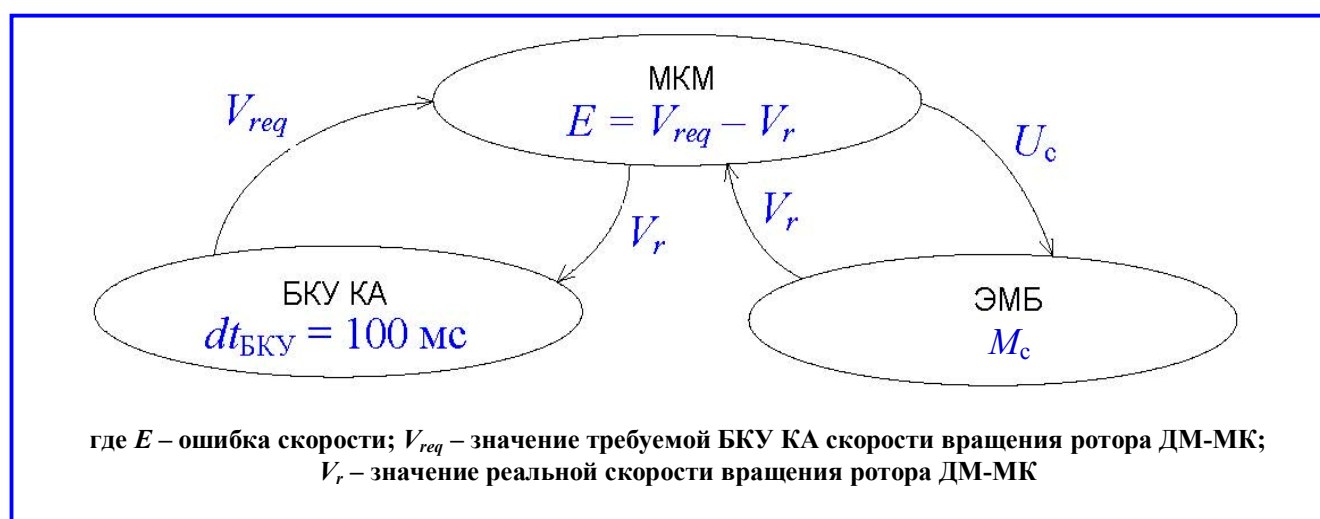


Рис. 11. Функциональная блок-схема причинно-следственных связей для построения математической модели

в режиме управления скоростью ДМ-МК (табл. 2). Найти: функцию управления и создать методологию управления прототипа ДМ-МК в режиме заданной скорости вращения ротора для высокочастотных КА.

Для поиска функции управления ДМ-МК в режиме заданной скорости вращения ротора для высокочастотных КА были проанализированы внутренние связи и воздействующие факторы (рис. 11). Отметим, что поиск осуществлялся для всего рабочего диапазона скоростей вращения ротора, где величины

тормозных моментов, наличие которых обусловлено различными факторами (в том числе моментами трения подшипников, изменяющимися свойствами смазок, термическими процессами в конструкции и т. д.) для разных скоростей различны. Поэтому в решаемой задаче поиска функции управления была учтена нелинейность данной системы, обусловленной изменением электромеханических характеристик во всем скоростном диапазоне в течение всего срока жизни изделия. Подробный материал по поиску функции управления изложен в материалах статей автора [36 – 38].

### Результаты создания методологии управления ДМ-МК скоростью вращения ротора для высокودинамичных космических аппаратов

Структурная схема созданной методологии представлена на рис. 12.

Данная методология имеет два уровня: теоретический и эмпирический. Теоретический уровень включает: принципы, понятия, подходы и теории в проведенном исследовании.

**Понятия** теоретического уровня: цель, объект, предмет теоретических методов исследования.

**Целью** является исследование и создание методологии управления ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротора для высокودинамичных КА.

**Объектом исследования** является прототип электропривода ДМ, выполненный на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с интегрированным в его схему узлом МК-управления.

**Предметом исследования** является анализ способа МК-управления ДМ в режиме управления скоростью вращения ротора для высокودинамичных КА.

**Методы исследования**, примененные при создании методологии, включают следующие методы: системного анализа, исследований операций, теории принятия решений, дискретной оптимизации, математического программирования, искусственного интеллекта и экспертных систем, информационных систем и технологий, статистической обработки, теории отношений и графов, теории автоматического управления, теории интегральных и дифференциальных уравнений, линейной и булевой алгебры, а также теории электрических машин и электропривода.

Примененные **подходы** исследования основаны на соблюдении созданной концепции управления, основанной на обеспечении получения необходимой географической привязки различных измерений, проводимых КА ДЗЗ (спектрозональная измерительная информация), а также обеспечения минимального искажения, получаемых изображений (изображения подстилающей поверхности Земли в различных областях спектра электромагнитных волн), КА должны иметь высокую точность ориентации в орбитальной системе координат и стабилизации собственных угловых скоростей аппарата вокруг центра масс. Точность ориентации и стабилизации КА должна быть тем выше, чем выше пространственная разрешающая способность аппаратуры ДЗ и требования географической привязки.

Особое внимание должно быть уделено динамическим характеристикам КА с тем, чтобы не допускать некомпенсированных возмущающих моментов при съемке или измерениях.

Концепция создания МК-системы управления ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротора ориентирована на обеспечение характеристик ДМ-МК, как исполнительных органов системы ориентации и стабилизации высокودинамичных КА. Эта концепция подразумевает осуществление максимально допустимого быстродействия вращения КА вокруг центра масс, и его высокоточную стабилизацию за минимальное время. Таким образом, все режимы управления высокودинамичным КА, обеспечиваемые системой ориентации и стабилизации КА, можно разделить по двум критериям эффективности:

- критерий быстродействия выполнения угловых маневров КА;
- критерий точности обеспечения требований по допустимому отклонению частоты вращения ротора в режиме управления скоростью вращения ротора ДМ-МК.

Благодаря использованной **теории** различных научных дисциплин построена математическая модель и найдена функция управления ДМ-МК в режиме управления по скорости вращения ротора для высокودинамичных КА.

С помощью системного анализа, базирующегося на теории отношений и графов [39], было проведено исследование ДМ-МК как системы. По итогам данного исследования был построен функциональный ориентированный граф отработки новой требуемой скорости вращения ротора ( $V_{req}$ ) ДМ-МК для высокودинамичных КА (рис. 13).

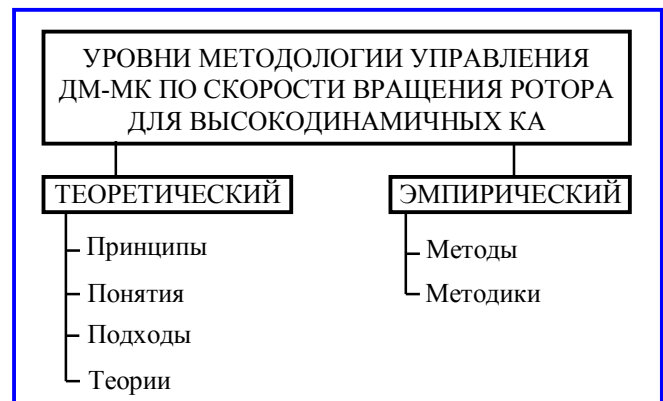


Рис. 12. Структура методологии управления ДМ-МК по скорости вращения ротора для высокودинамичных КА

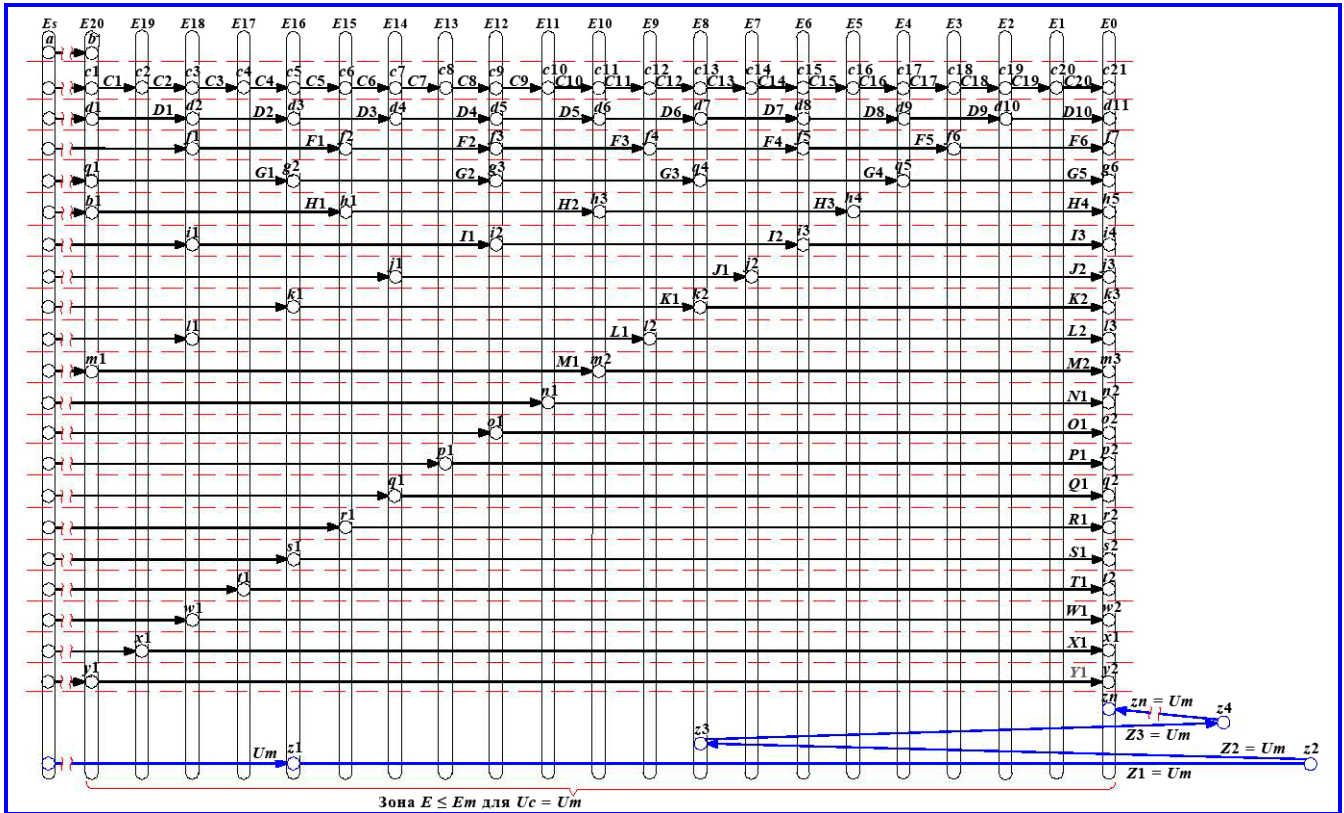


Рис. 13. Функциональный ориентированный граф обработки новой требуемой скорости вращения ротора ДМ-МК

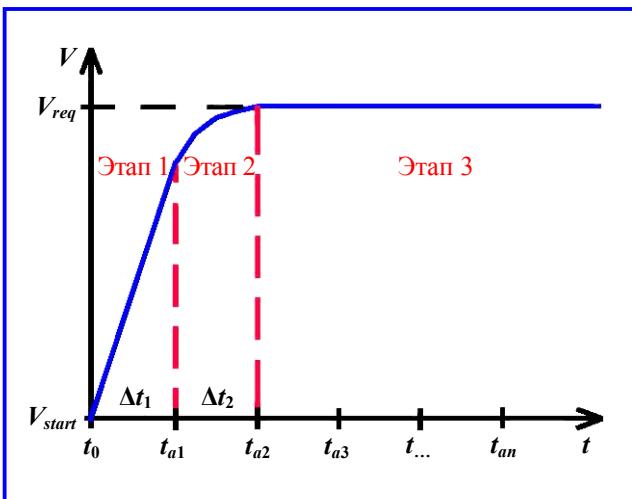


Рис. 14. Этапы выхода и стабилизации новой требуемой скорости вращения ротора ДМ-МК

Результатом анализа, проведенного с помощью ориентированного графа методом декомпозиции, были определены слагаемые этапы функции управления (рис. 14) и выявлены критерии эффективности решения каждого этапа.

Согласно теоретическому подходу созданной методологии, ориентированному на концепцию управления высокودинамичными КА, были найдены функции управления декомпозиционных слагаемых этапов.

При этом были использованы следующие законы регулирования и методы решений:

этап 1 был решен с помощью двухпозиционного закона регулирования;

этап 2 был решен с помощью численного модифицированного метода Эйлера;

этап 3 был решен с помощью математического метода наименьших квадратов и пропорционально-интегрального закона регулирования [40].

Созданная методология, благодаря использованной **теории** различных научных дисциплин, включила в себя различные методики: методику решения задачи нейтрализации значения ошибки скорости вращения ротора ДМ-МК отличного от нуля; методику компенсации  $M_c$  для всего рабочего диапазона скоростей вращения ротора; методику управления ДМ-МК бортовым комплексом управления (БКУ) КА и т. д.

Эмпирический уровень включил в себя: **методы** (натурные испытания) и **методики** экспериментальной проверки изысканий теоретического уровня методологии управления ДМ-МК скоростью вращения ротора для высокودинамичных КА. Были представлены необходимые сигналы обмена между БКУ КА и ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротора (рис. 15) согласно созданной методологии.



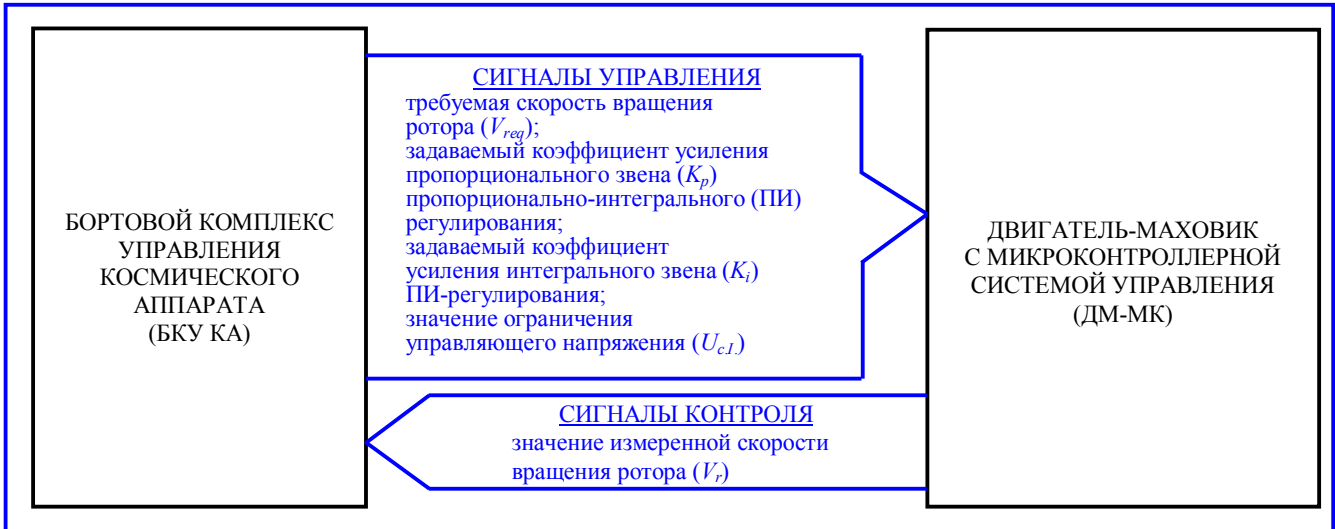


Рис. 15. Сигналы обмена между БКУ КА и ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротора

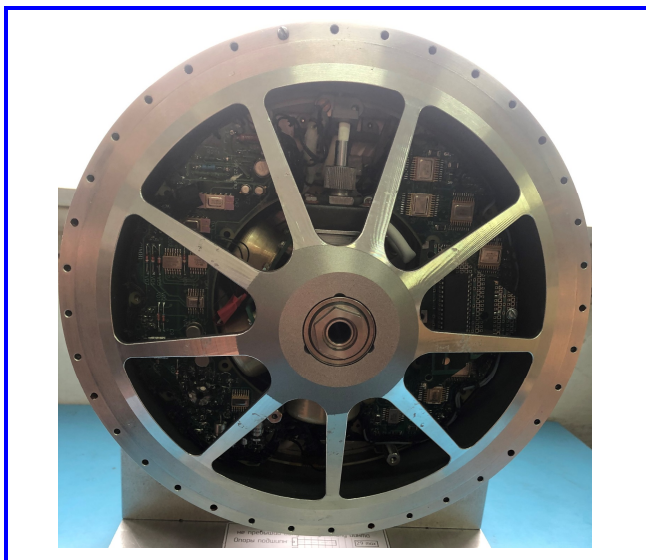


Рис. 16. Прототип ДМ-МК (без защитного кожуха), установленный на кронштейне

По итогам проделанной работы для натурных испытаний был создан прототип ДМ-МК (рис. 16).

Найденная в диссертационной работе функция управления ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротором для высокодинамичных КА

была реализована в программном обеспечении (ПО) ДМ-МК, с помощью языка программирования Assembler [41, 42]. Данное ПО ДМ-МК было запрограммировано в постоянное запоминающее устройство и интегрировано в схему прототипа ДМ-МК.

Натурные испытания осуществлялись с помощью комплекта проверочной аппаратуры (КПА), разработанного в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (рис. 17). Данный КПА представляет собой рабочее место, в составе которого на персональном компьютере установлено специальное программное обеспечение (ПО-КПА). КПА с ДМ-МК подключается с помощью специальных согласующих плат по МКО информацией, интерфейс которого выполнен согласно [29]. КПА симулирует работу БКУ КА и обеспечивает формирование и передачу по МКО пакетов информации, в состав которых входят необходимые сигналы обмена для отработки режима управления по скорости вращения ротора (рис. 15).

Натурные испытания подтвердили адекватное применение для решения поставленных задач теоретических методов и доказали работоспособность созданной методологии управления ДМ-МК по скорости вращения ротора для высокодинамичных КА.

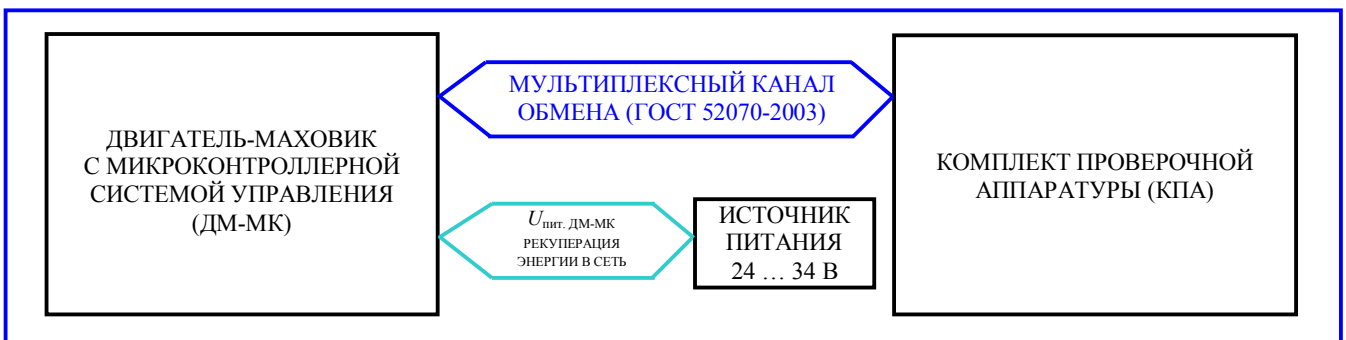


Рис. 17. Натурные испытания ДМ-МК

В настоящее время созданная универсальная методология управления ДМ-МК скоростью вращения ротора внедрена в несколько работ, ведущихся в АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

*Автор выражает признательность сотрудникам АО «Корпорация «ВНИИЭМ»:* Л. А. Макриденко, А. П. Сарычеву, А. В. Рогозе, А. С. Абдурагимову, С. В. Медушеву, М. Ю. Щетинину, В. К. Кузьмину, Р. С. Городецкому, В. К. Кубраку, А. С. Медушеву, И. В. Соколунову за возможность создания и содействие в отработке микроконтроллера управления на образцах двигателей-маховиков, разработанных и выпускаемых АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

### Литература

1. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. П. Ходненко [и др.]. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 15 – 26.
2. Международные тенденции создания и эксплуатации малых космических аппаратов / В. И. Лукьященко, В. К. Саульский, В. А. Шучев // III Международная конференция – выставка «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке», 27 – 31 мая 2002, г. Королев, Моск. обл., ЦНИИМАШ. – Кн. 1.
3. Анализ состояния работ по МКА наблюдения и возможностей использования их в интересах мониторинга природной среды / Ю. Г. Пичурин // PoliticWar.ru : [сайт]. – 2000. – URL : <http://www.politicwar.ru/> (дата обращения: 18.01.2018).
4. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования / Е. В. Патраев, Ю. В. Максимов // Известия высших учебных заведений – Приборостроение. – Санкт-Петербург, 2008. – Т. 51. – № 8. – С. 5 – 12.
5. Урличич Ю. М., Данилин Н. С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики / Ю. М. Урличич, Н. С. Данилин. – Москва : Макс ПРЕСС, 2003. – 204 с.
6. Баженов А. В. Основы бортовых вычислительных машин / А. В. Баженов. – 2-е изд., перераб. – Ставрополь : СВВАИУ (ВИ), 2008. – 338 с.
7. Макриденко Л. А. Космические системы, комплексы и аппараты дистанционного зондирования разработки АО «Корпорация «ВНИИЭМ» : [в 2 томах] / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.]. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – 2 т. – Текст : непосредственный.
8. Куренков В. И. Конструкция и проектирование изделий ракетно-космической техники. Часть 2. Основы проектирования ракет-носителей / В. И. Куренков. – Самара : Государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева. – 2012. – 304 с.
9. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическими аппаратами «Канопус-В» № 5 и № 6. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2018. – 124 с.
10. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ». – 2010. – 110 с.
11. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическими аппаратами «Канопус-В» № 3 и № 4. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2017. – 128 с.
12. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК». – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2017. – 130 с.
13. Белорусский космический комплекс дистанционного зондирования Земли. – Москва : ФГУП «НПП «ВНИИЭМ», 2011. – 88 с.
14. Научно-исследовательский космический аппарат «Ломоносов» – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – 138 с.
15. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 1. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ». – 2010.
16. Бортовые информационные комплексы КА «Ресурс-О1» / М. В. Новиков, Ю. М. Тугин, В. Ф. Бабенков // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 1999. – Т. 99 – С. 73 – 82.
17. Космический аппарат природно-ресурсного, метеорологического и гелиогеофизического назначения «Ресурс-О1» № 4 / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 149. – № 6. – С. 44 – 50.
18. Геостационарная космическая система «Электро» (ГОМС): предпосылки создания и структура / С. А. Стома, Ю. В. Трифонов // Геостационарный метеорологический космический аппарат «Электро». Труды ВНИИЭМ. – Москва : НПП ВНИИЭМ, 1998. – Т. 98. – С. 5 – 16.
19. Проект «КОРОНАС-ФОТОН» / С. Н. Волков, А. В. Горбунов, Р. С. Салихов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 168. – № 1. – С. 44 – 56.
20. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2014. – 158 с.
21. Экспериментальный научно-исследовательский малый космический аппарат «Университетский – Татьяна-2» : справочные материалы. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 31 с.
22. SSTL delivers on Russian KANOPUS missions // SSTL. – 6 Mar 2009. – URL : <http://sstl.co.uk> (дата обращения 18.01.2018).
23. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» / А. В. Горбунов, И. Н. Слободской. – Москва : ГЕОМАТИКА, 2010. – № 1. – С. 30 – 33.

24. АО «НПО «Полус» : официальный сайт. – Москва. – URL : <http://polus.tomsknet.ru> (дата обращения: 18.01.2018).
25. АО «Корпорация «ВНИИЭМ» : официальный сайт. – Москва. – URL : <http://www.vniiem.ru> (дата обращения: 18.01.2018).
26. Электродвигатель-маховик постоянного тока / В. Я. Журавлев, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов [и др.] // Прецизионные электромеханические устройства. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ВНИИЭМ, 1985. – Т. 78. – С. 67–74.
27. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2-1. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2017. – 156 с.
28. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 2-2. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2019. – 150 с.
29. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательной 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.
30. Особенности цифрового управления двигателя-маховика АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для высокودинамичных космических аппаратов / В. Д. Бабишин, Д. Ю. Дементьев, В. С. Мартынов [и др.]. – Королев : Космическая техника и технологии. – 2019. – № 2 (25) апрель – июнь. – С. 107–111.
31. Анучин А. С. Системы управления электроприводами / А. С. Анучин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с. : ил.
32. Фрунзе А. В., Фрунзе А. А. Микроконтроллеры? Это же просто! : в 4 томах / А. В. Фрунзе, А. А. Фрунзе. – Москва : ООО «ИД СКИМЕН», 2003. – 4 т. – Текст : непосредственный.
33. Тихомиров Э. Л. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ / Э. Л. Тихомиров, В. В. Васильев, Б. Г. Коровин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 319 с.
34. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. – Москва : Эхо, 2013. – 66 с. : ил.
35. Унифицированный модуль управления СОСБ малых КА на основе микроЭВМ / В. В. Некрасов, М. Ю. Шетинин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 107. – С. 46–50.
36. 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) январь – март. – С. 126–134.
37. Построение математической модели микроконтроллерной системы управления двигателя-маховика в режиме заданной скорости с помощью различных математических методов и законов регулирования / В. В. Некрасов / Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 171. – № 4. – С. 3–8.
38. 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.
39. Зыков А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков. – Москва : Вузовская книга, 2004. – С. 664.
40. Статические методы оценки стабильности функционирования технических систем / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. – Пенза, 2018. – № 2 – С. 36–42.
41. Eight-Bit 80C51. Embedded Processors. Data Book / Advanced Micro Devices. – 1989. – [346] p.
42. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах / В. В. Сташин, А. В. Урусов, О. Ф. Мологонцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 224 с.

Поступила в редакцию 17.08.2020

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

## UNIVERSAL METHODOLOGY OF A MICROCONTROLLER SYSTEM FOR CONTROLLING SPEED OF REACTION WHEEL ROTOR FOR HIGHLY DYNAMIC SPACECRAFT

**V. V. Nekrasov**

*A universal methodology of a microcontroller system for controlling the speed of a rotor of a reaction wheel for highly dynamic spacecraft was developed. This methodology includes a set of different procedures used for fulfilment of different tasks, such as: neutralizing the value of the rotor non-zero rate error; compensating the moment of resistance for all operating range of rotor speed; controlling the reaction wheel of the*

spacecraft on-board control system, etc. The methodology has two levels in terms of its structure: theoretic and empiric. The developed control methodology was introduced into VNIIEM Corporation JC activities based on the results of full-scale tests.

**Key words:** reaction wheel, methodology, procedure, microcontroller system, rotor speed control, highly dynamic spacecraft.

## References

1. Conceptual issues of development and application of small spacecraft / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, V. P. Khodnenko [et al.]. // Matters of electromechanics. NPP VNIIEM proceedings. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEM’, 2010. – Vol. 114. – No. 1. – Pp. 15 – 26.
2. International trends in development and operation of small spacecraft / V. I. Lukiashchenko, V. K. Saulskii, V. A. Shuchev // III<sup>rd</sup> International Conference-Exhibition ‘Small satellites. New technologies. Miniaturization. Areas of efficient application in XXI<sup>st</sup> century’, 27 – 31 May 2002, Korolev, Moscow region, TSNIIMASH. – Book 1.
3. Analysis of status of works with respect to small observation satellites and possibility to use them for environmental monitoring / Iu. G. Pichurin // PoliticWar.ru : [website]. – 2000. – URL : <http://www.politicwar.ru/> (date of access: 18.01.2018).
4. Methods for ensuring the reliability of on-board equipment of long-term operation spacecraft / E. V. Patraev, Iu. V. Maksimov // Journal of Instrument Engineering. – Saint-Petersburg, 2008. – V. 51. – No. 8. – Pp. 5 – 12.
5. Urlichich Iu. M., Danilin N. S. Radio-electronic equipment quality control in the context of global open economy / Iu. M. Urlichich, N. S. Danilin. – Moscow : Maks PRESS, 2003. – 204 p.
6. Bazhenov A. V. Basic principles of on-board computers / A. V. Bazhenov. – 2<sup>nd</sup> edition, revised. – Stavropol : Stavropol Higher Military Aviation School of Pilots and Navigators of the Air Defense Forces, 2008. – 338 p.
7. Makridenko L. A. Space systems, complexes and spacecraft for Earth remote sensing developed by VNIIEM Corporation JC : [in 2 volumes] / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov [et al.]. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2018. – 2 volumes. – Text : direct.
8. Kurenkov V. I. Design and development of rocket and space equipment. Part 2. Basic principles of launch vehicle design / V. I. Kurenkov. – Samara : State Aerospace University named after S. P. Korolev. – 2012. – 304 p.
9. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V № 5 and № 6. – Moscow : VNIIEM Corporation JC. – 2018. – 124 p.
10. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V № 1. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEM’. – 2010. – 110 p.
11. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V № 3 and № 4. – Moscow : VNIIEM Corporation JC. – 2017. – 128 p.
12. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V-IK. – Moscow : VNIIEM Corporation JC. – 2017. – 130 p.
13. Belarusian Earth remote sensing space system. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEM’, 2011. – 88 p.
14. Scientific satellite Lomonosov – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2015. – 138 p.
15. Hydrometeorological and oceanographic space system Meteor-3M with Meteor-M № 1. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEM’. – 2010.
16. On-board information systems of Resurs-O1 satellite / M. V. Novikov, Iu. M. Tugin, V. F. Babenkov // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEM’, 1999. – V. 99 – Pp. 73 – 82.
17. Meteorological, helio-geophysical and natural resources monitoring spacecraft Resurs-O № 4 / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov [et al.] // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2015. – V. 149. – No. 6. – Pp. 44 – 50.
18. Geostationary space system Electro (GOSM): development background and structure / S. A. Stoma, Iu. V. Trifonov // Geostationary meteorologic spacecraft Electro. VNIIEM proceedings. – Moscow : NPP VNIIEM, 1998. – V. 98. – Pp. 5 – 16.
19. CORONAS-PHOTON project / S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, R. S. Salikhov [et al.] // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2019. – V. 168. – No. 1. – Pp. 44 – 56.
20. Hydrometeorological and oceanographic space system Meteor-3M with Meteor-M № 2. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC. – 2014. – 158 p.
21. Experimental scientific small satellite Universitetsky-Tatiana-2 : reference information. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIIEM’, 2009. – 31 p.
22. SSTL delivers on Russian KANOPUS missions // SSTL. – 6 Mar 2009. – URL : <http://sstl.co.uk> (date of access: 18.01.2018).
23. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V / A. V. Gorbunov, I. N. Slobodskoi. – Moscow : GEOMATIKA, 2010. – No. 1. – Pp. 30 – 33.
24. JSC Research and Production Center ‘Polyus’ : official website. – Moscow. – URL : <http://polus.tomsknet.ru> (date of access: 18.01.2018).
25. VNIIEM Corporation JC : official website. – Moscow. – URL : <http://www.vniiem.ru> (date of access: 18.01.2018).
26. DC electric reaction wheel / V. Ia. Zhuravlev, V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov [et al.] // High-precision electromechanical devices. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM, 1985. – V. 78. – Pp. 67 – 74.
27. Hydrometeorological and oceanographic space system Meteor-3M with Meteor-M № 2-1. – Moscow : VNIIEM Corporation JC. – 2017. – 156 p.

28. Hydrometeorological and oceanographic space system Meteor-3M with Meteor-M № 2-2. – Moscow : VNIIEM Corporation JC. – 2019. – 150 p.
29. GOST R 52070-2003. Bus serial interface of electronic modules system. General requirements : state standard of the Russian Federation: official edition: approved and brought into force by the Resolution of the Committee of the Russian Federation for Standardization, Metrology and Certification on 5 June 2003 No. 182-ст : introduced for the first time: introduction date 01.01.2004 / Prepared by the State Research Institute of Aviation Systems with participation of the Standardization and Unification Research Institute. – Moscow : Standards Publishing House, 2003. – 23 [1] p.
30. Specific features of digital control of VNIIEM Corporation JC reaction wheel for highly dynamic spacecraft / V. D. Babishin, D. Iu. Dementev, V. S. Martynov [et al.]. – Korolev : Space equipment and technologies. – 2019. – No. 2 (25) April-June. – Pp. 107 – 111.
31. Anuchin A. S. Electric drives control systems / A. S. Anuchin. – Moscow : MEI Publishing House, 2015. – 373 p. : with figures.
32. Frunze A. V., Frunze A. A. Microcontrollers? It's easy! : in 4 volumes / A. V. Frunze, A. A. Frunze. – Moscow : JSC 'SKIMEN Publishing House', 2003. – 4 volumes. – Text : direct.
33. Tikhomirov E. L. Microprocessor control of programmable controlled machines / E. L. Tikhomirov, V. V. Vasilev, B. G. Korovin. – Moscow : Machine engineering, 1990. – 319 p.
34. Kalachev Iu. N. Vector control (practician's notes) / Iu. N. Kalachev. – Moscow : Echo, 2013. – 66 p. : with figures.
35. Unified control module for SA orientation system of small satellites based on a microcomputer / V. V. Nekrasov, M. Iu. Shchetinin // Matters of electromechanics. NPP VNIIEM proceedings. – Moscow : FSUE 'NPP VNIIEM', 2008. – V. 107. – Pp. 46 – 50.
36. Constructing a mathematical model of microcontroller system for reaction wheel control in specified speed mode for highly dynamic spacecraft using graphs / V. V. Nekrasov // Space equipment and technologies. – Korolev, 2020. – No. 1 (28) January – March. – Pp. 126 – 134.
37. Constructing a mathematical model of microcontroller system for reaction wheel control in specified speed mode using different mathematical methods and control laws / V. V. Nekrasov / Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2019. – V. 171. – No. 4. – Pp. 3 – 8.
38. Optimization of mathematical model of reaction wheel microcontroller system for highly dynamic spacecraft / V. V. Nekrasov / Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2019. – V. 173. – No. 6. – Pp. 33 – 40.
39. Zykov A. A. Basic principles of graph theory / A. A. Zykov. – Moscow : Vuzovskaya kniga (University Book) Publishing House, 2004. – Pp. 664.
40. Strategic methods for evaluation of stability and functioning of technical systems / V. N. Klyachkin, I. N. Karpunina // Reliability and quality of difficult systems. – Penza, 2018. – No. 2 – Pp. 36 – 42.
41. Eight-Bit 80C51. Embedded Processors. Advanced Micro Devices. 1990 Data Book. – 1989.
42. Design of digital devices based on one-chip microcontrollers / V. V. Stashin, A. V. Urusov, O. F. Mologontseva. – Moscow : Energoatomizdat, 1990. – 224 p.

*Vladimir Viktorovich Nekrasov, Leading Engineer, Ph. D. Student,  
tel.: +7 (495) 366-20-56, e-mail: vvv17@list.ru.  
(JC «Corporation VNIIEM»).*