

УДК 629.7.062.2

Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург, Г.Я. Михальченко

Цифровой астатический электропривод систем ориентации и стабилизации космических аппаратов

Рассматриваются особенности проектирования систем управления для высокоточных электроприводов силовых гироскопических приборов – управляющих двигателей-маховиков и гироскопов. Улучшение точностных и динамических показателей достигнуто за счет применения принципа фазовой синхронизации, эталонной цифровой модели в контуре управления и высокопроизводительных цифровых вычислительных систем. Приведены структурная схема, ее описание, результаты эксперимента.

Ключевые слова: управляющий двигатель-маховик, силовой гироскоп, динамический момент, эталонная цифровая модель, частотно-фазовый дискриминатор, синхронный двигатель с постоянными магнитами, система ориентации и стабилизации космического аппарата.

Инерционные электромеханические исполнительные органы, такие как управляющие двигатели-маховики (УДМ) и двухстепенные силовые гироскопы (гироскопы), являются ключевыми активными элементами большинства современных систем ориентации и стабилизации (СОС) космических аппаратов. Функционально задача управления УДМ заключается в формировании управляющего динамического момента по одной из координатных осей платформы космического аппарата (КА) пропорционально сигналу задания, что, в свою очередь, сводится к управлению ускорением маховика. Основная задача гироскопа – формирование управляющего момента M_y за счет обеспечения пропорциональной зависимости угловой скорости рамки гироскопа (с раскрученным до номинальной скорости маховиком) от сигнала задания. В этих приборах в качестве преобразователя электрической энергии в механическую выступают синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), характеризующиеся гибкостью управления частотой вращения ротора и моментом, отсутствием контактных колец и, как следствие, гарантированным достижением требуемого срока активного существования двигателя.

К основным параметрам бортовых электроприводов такого рода относятся: управляющий момент M_y и уровень его пульсаций ΔM_y , крутизна регулировочной характеристики S , момент сопротивления вращению M_c , момент трогания M_t , время установления управляющего момента t_y .

Существенное влияние на погрешность формирования динамического момента УДМ оказывают M_c и M_t , которые зависят от технологии изготовления, качества опорных подшипников, нагрузки на подшипники, вязкости смазки, давления окружающей среды, температуры, времени наработки и т.д. Кроме того, M_t ограничивает чувствительность СОС, поскольку является функцией положения ротора и времени его нахождения в неподвижном состоянии. Погрешности формирования управляющего момента гироскопа, кроме паразитных моментов электродвигателя привода вращения рамки (ПВР), также связаны с кинематической погрешностью редуктора и отсутствием точного датчика скорости.

В целом способы управления динамическим моментом УДМ подразделяются на непосредственные и косвенные. Принцип действия устройств, основанных на непосредственном способе, заключается в измерении и введении в цепь обратной связи либо углового ускорения $\varepsilon = d\omega/dt = M_d/J$, либо деформации упругих элементов, значение которой пропорционально связано с M_d . Однако такие устройства в бортовой космической технике не применяются из-за сложности, низкой чувствительности при небольших частотах вращения, малой механической прочности. Практическое применение получил способ косвенного управления по электромагнитному моменту УДМ, но влияние паразитных моментов двигателя в данном случае ничем не компенсируется.

Одним из вариантов проектирования систем управления электроприводами СОС КА является способ, основанный на переносе низкочастотных сигналов задания и обратной связи по частоте вращения ротора СДПМ в область высоких частот с использованием математического аппарата однополосной модуляции [1–3]. При этом в качестве сигналов задания выступают выходные сигналы эталонной цифровой модели (ЭЦМ) УДМ или гироскопа.

Однако остаются неразрешенными вопросы начальной синхронизации сигнала ошибки регулирования частоты вращения двигателя в нештатных и переходных режимах, например в режимах включения питания, переключения с основного канала управления на резервный или при возникновении сбоев в бортовой системе электропитания. Если начальная синхронизация не предусмотрена и в такие моменты частота вращения ротора отлична от нуля, то двигатель с максимальным электромагнитным моментом будет тормозиться до нулевой начальной скорости (которая автоматически установится в регуляторе), прикладывая при этом к корпусу КА недопустимый неконтролируемый управляющий момент.

В настоящей работе рассматривается один из путей развития систем управления электроприводами СОС КА, позволяющий применить математический аппарат однополосной модуляции и реализовать начальную синхронизацию текущей частоты вращения двигателя и задающего воздействия в нештатных и переходных режимах работы. Синхронизация основана на взаимном согласовании режимов работы двух автономных контуров регулирования I и II, как показано на рис. 1. Конфигурацию этих контуров обеспечивают устройство коммутации УКК и ключи К1, К2. В частности, при показанном на рис. 1 состоянии ключей контур регулирования I образован эталонной цифровой моделью электропривода ЭЦМ, преобразователями частоты ПЧ1, ПЧ2, генератором опорной частоты ГОЧ, частотно-фазовым дискриминатором ЧФД, корректирующим устройством КУ, электромеханическим преобразователем энергии ЭМП, в состав которого входят СДПМ, датчик положения ротора (ДПР) и регуляторы тока.

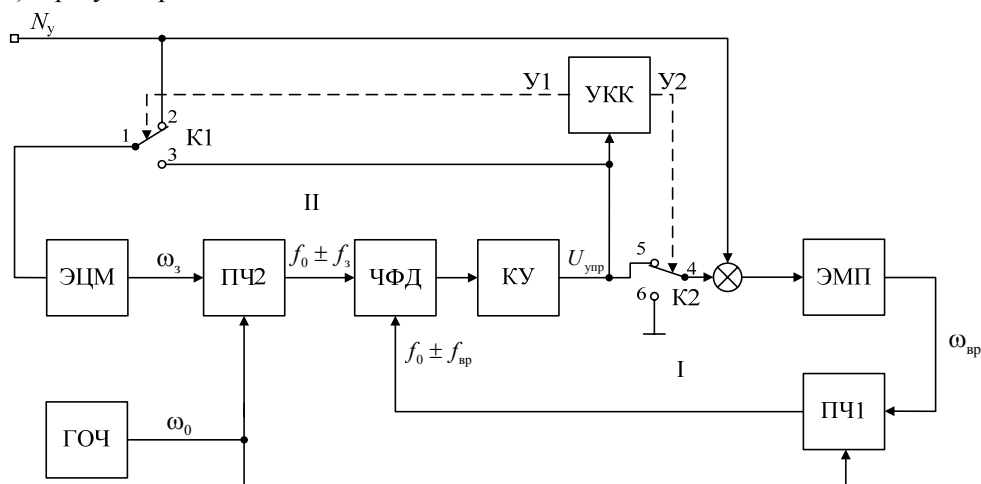


Рис. 1. Обобщенная структурная схема электропривода

В штатном режиме функционирования регулирование частоты вращения реализуется контуром I на основе обработки информации о задающем воздействии N_y и текущей частоте вращения $\omega_{вр}$ ротора СДПМ в области высокой опорной частоты ω_0 с использованием принципа однополосной модуляции, последующим сравнением частот $\omega_0 \pm \omega_3$ и $\omega_0 \pm \omega_{вр}$ посредством ЧФД и обработкой сигнала ошибки с помощью КУ [3]. Также следует отметить, что для упрощения системы управления тригонометрические операции могут быть заменены на цифровые методы обработки информации, что позволяет производить сложение различных частот с большой точностью.

Для согласования начальных значений ЭЦМ с текущей частотой вращения и угловым положением ротора УДМ, т.е. для принудительной синхронизации, структурная схема реконфигурируется с помощью УКК: контакты 1 и 2, 4 и 5 размыкаются, а контакты 1 и 3, 4 и 6 замыкаются. При этом контур I размыкается и замыкается контур II, информационный вход ЭМП обнуляется и сигнал управления динамическим моментом N_y отключается от входа модели. В образованном контуре синхронизации в качестве задающего воздействия выступает сигнал с выхода преобразователя ЧФД, а регулируемые величины являются частота ω_3 и фаза φ_3 ЭЦМ. После вхождения в синхронизм параметров цифровой модели (частоты и фазы) с текущими параметрами вращения УДМ производится обратное переключение контуров в режим управления динамическим моментом: замыкаются контакты 1 и 2, 4 и 5 и размыкаются 1 и 3, 4 и 6.

Немаловажным является определение моментов коммутации контуров в УКК, исключающее случайные переключения. Это достигается слежением за сигналом ΔU фазового рассогласования φ

(положением рабочей точки ЧФД). На рис. 2, а характеристика ЧФД приведена к симметричному относительно начала координат виду, необходимому для управления УДМ в обоих направлениях. Ее рабочим участком, на котором идет управление динамическим моментом, является линейный участок A_1-B_1 , выбранный с запасом по отношению ко всей линейной зоне $A-B$, в пределах которого необходимый для управления двигателем сигнал рассогласования ΔU обеспечивается за счет разности фаз входных импульсов при равенстве их частот. Этот же сигнал используется для переключения контуров и является функцией многозначной логической нелинейности характеристики ЧФД. Соответствующая функция переключения УКК показана на рис. 2, б. Его выходными сигналами являются сигналы управления ключами К1 и К2, обозначенные как У1 и У2 соответственно. На рис. 2, а горизонтальными штрихпунктирными линиями отмечены пороговые значения ΔU , ($\Delta U_{\text{сраб+}}$, $\Delta U_{\text{сраб-}}$, $\Delta U_{\text{отп+}}$, $\Delta U_{\text{отп-}}$), соответствующие моментам перехода УКК из одного состояния в другое (срабатывание и отпускание). При выходных управляющих сигналах УКК $У1=У2=0$ работает основной контур I управления динамическим моментом, рабочая точка которого перемещается по характеристике ЧФД в пределах отрезка A_1-B_1 .

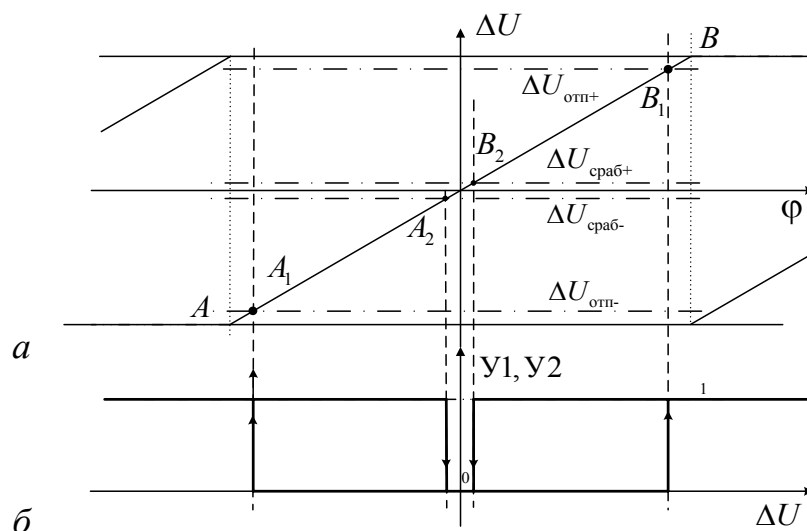


Рис. 2. Диаграммы работы УКК

Выход рабочей точки за пределы этого участка и переход на горизонтальную часть характеристики, указывающий на рассогласование частот, вызывает переключение управляющих сигналов УКК в состояние $У1 = У2 = 1$, при котором размыкается основной контур I и замыкается контур синхронизации II. При совмещении координат цифровой модели по частоте и фазе с соответствующими координатами УДМ рабочая точка на характеристике ЧФД перемещается в окрестность точки начала координат (отрезок $A_2 - B_2$) и УКК переключается в положение $У1 = У2 = 0$, замыкая основной I и размыкая дополнительный II контуры системы.

Вследствие того, что координаты УДМ при работе контура I всегда согласованы с координатами ЭЦМ, обеспечивается возможность точной стабилизации частоты вращения маховика. При подаче кода управления $N_y = 0$ на определенной частоте вращения последняя фиксируется и остается неизменной вплоть до подачи нового кода управления, отличного от нуля, а момент сопротивления при этом компенсируется необходимым значением фазного тока.

Система с некоторыми модификациями, о которых будет сказано ниже, может быть также использована для управления ПВР гиродина, что позволяет повысить точность реализации угловой скорости и обеспечить равномерность движения рамки гироскопа по сравнению с системами, работающими на основе обратной связи по угловой скорости рамки или ПВР. Приведенное выше описание работы электропривода УДМ является наиболее общим случаем. Отличия систем управления для УДМ и ПВР гиродина заключаются в следующем:

- кодовый сигнал задания N_y для гиродина определяет скорость вращения рамки, а для УДМ - ускорение маховика;
- ЭЦМ ПВР гиродина состоит из одного интегратора, а ЭЦМ УДМ - из двух;
- инверторы в составе ПВР выполняют функцию регуляторов напряжения, а в УДМ - регуляторов тока;

- для ПВР в качестве обратной связи вместо сигнала ДПР может быть использован сигнал с датчика угла положения рамки в зависимости от того, какой из них обеспечит наибольшую точность и наименьший коэффициент пульсаций по угловой скорости;
- синхронизация для ПВР осуществляется по одной переменной (углу), а для УДМ – по двум (частоте вращения и углу);
- для уменьшения времени синхронизации в ПВР гиродина при использовании в качестве обратной связи сигнала с датчика угла рамки вместо контура синхронизации может быть применена операция инициализации интегратора ЭЦМ текущим значением углового положения рамки.

На основе обобщенной структурной схемы системы управления бортовым электроприводом (рис. 2) разработана цифровая система, представленная на рис. 3.

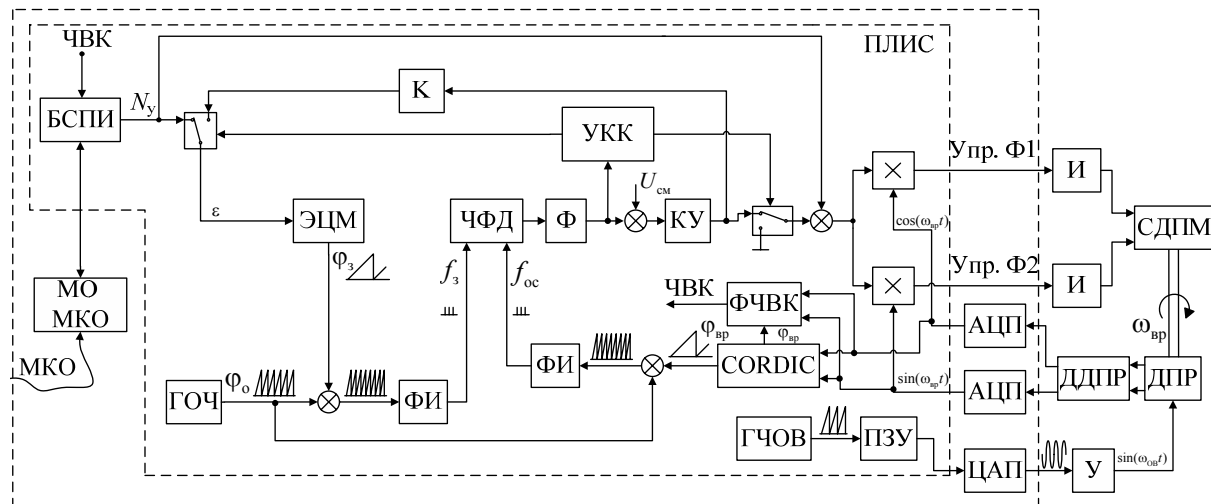


Рис. 3. Структурная схема цифрового привода

Основным вычислительным устройством такой системы является программируемая логическая схема (ПЛИС) отечественного производства 5576ХС1Т. Входной кодový сигнал управления поступает по мультиплексному каналу обмена (МКО) [4], обрабатывается в ПЛИС блоком сопряжения и преобразования информации (БСПИ), откуда поступает на сумматор и определяет основную составляющую сигнала задания для инверторов. Второй составляющей сигнала задания инверторов является выходной сигнал контура коррекции углового положения двигателя, который отслеживает угловое рассогласование между ЭЦМ и реальными координатами двигателя. Для работы на сверхнизких частотах вращения и с целью упрощения выявления фазного рассогласования применяются ЧФД и ГОЧ, определяющий частоты работы ЧФД. Питание ДПР осуществляется синусоидальным сигналом, сформированным в ПЛИС с помощью генератора частоты обмотки возбуждения (ГЧОВ) и постоянного запоминающего устройства (ПЗУ). Выходной код ПЗУ преобразуется в аналоговый сигнал с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП), проходит через усилитель мощности (У) и подается на обмотку возбуждения ДПР.

Демодулятор датчика положения ротора (ДДПР) формирует огибающую выходных сигналов ДПР, которая переводится в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Далее для получения из ортогональных гармонических сигналов пилообразного сигнала, соответствующего коду углового положения двигателя, применяется алгоритм Coordinate Rotate in Digital Compute (CORDIC) [5]. Полученный низкочастотный сигнал складывается с кодом опорной частоты и с помощью ЧФД сравнивается с аналогичным сигналом, поступающим от ЭЦМ. Сглаженный с помощью фильтра (Ф) и смещенный выходной сигнал ЧФД проходит через КУ, после чего представляет собой вторую составляющую для задающего сигнала инверторов. Блок формирования кода частоты вращения (ФЧВК) соединен с БСПИ и выдает контрольную информацию о текущем состоянии двигателя в бортовую вычислительную сеть.

В результате экспериментальных исследований было доказано, что регулировочные характеристики электроприводов УДМ и ПВР гиродина имеют линейный характер, смещение нулевого уровня отсутствует. Относительная погрешность крутизны моментной характеристики испытанного привода УДМ составила $-0,235\%$. Эта величина статическая, зависит только от постоянных време-

ни интеграторов ЭЦМ УДМ и может быть при необходимости сведена до минимума за счет повышения тактовой частоты цифровой системы (при испытаниях использовалась частота 20 МГц), увеличения разрядности интеграторов и последующей корректировки их коэффициентов. Время переходного процесса установления динамического момента составило не более 12 мс, перерегулирование отсутствовало. Результаты испытаний рассмотренной системы для управления ПВР гиродина показали ее работоспособность и улучшение качества выходных характеристик прибора. В этом эксперименте была достигнута кратность регулирования угловой скорости рамки гиродина 0,005 град./с с погрешностью не более 3 %.

Временная диаграмма на рис. 4 иллюстрирует мгновенные значения сигналов ЭЦМ и ДПР УДМ, зафиксированных при максимальном коде управления (торможение, реверс и разгон в противоположную сторону). Эти сигналы имеют аналогичный характер, при этом резкие отклонения от гармонической формы отсутствуют, следовательно, компенсация фазного рассогласования между цифровой моделью и ДПР УДМ является корректной. Однако на этих диаграммах видно наличие незначительных отклонений углового положения вала двигателя от идеальной траектории, формируемой с помощью интеграторов модели. Пульсации фактического динамического момента вызваны упоминавшимися ранее возмущающими моментами и нелинейными искажениями сигналов ДПР, что, в свою очередь, приводит к колебаниям фазного тока двигателя. Эти пульсации можно свести к минимуму за счет улучшения качества ДПР, применения калиброванного токового векторного управления [6] и более качественных подшипников (магнитного подвеса).

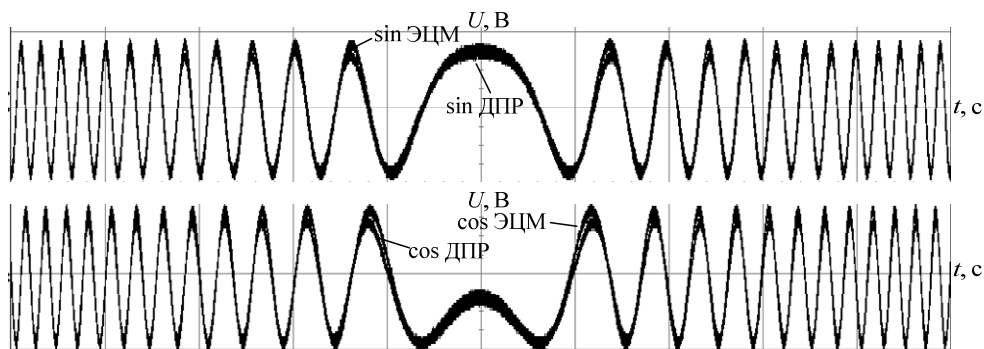


Рис. 4. Совмещение сигналов с выхода ДПР и ЭЦМ УДМ

Во всем диапазоне рабочих частот вращения время начальной синхронизации не превысило 0,9 с, что удовлетворяет техническим требованиям к электроприводам двигателей-маховиков. Следует отметить, что время синхронизации включает в себя время загрузки конфигурации в ПЛИС (приблизительно 130 мс), подсчета текущей частоты вращения (104,7 мс), от которой начнется синхронизация, и время согласования фазы и частоты ДПР с выходными сигналами ЭЦМ УДМ (рис. 5).

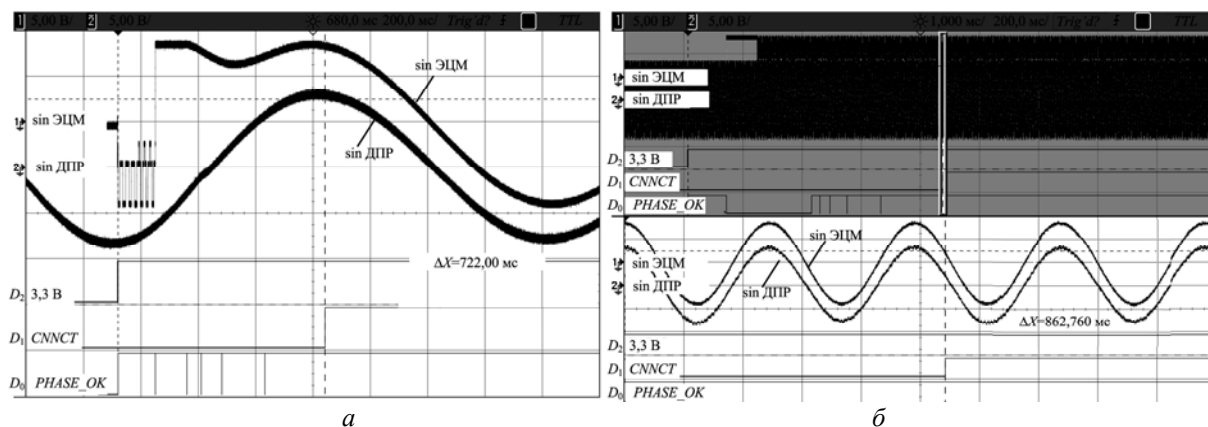


Рис. 5. Диаграммы втягивания электропривода в синхронизм: *a* – $\omega < 15$ об/мин; *б* – $\omega = 6000$ об/мин

Рассмотренный способ управления и синхронизации позволяет получить требуемые параметры электроприводов СОС КА: погрешность крутизны моментно-регулирующей характеристики в тре-

буемом диапазоне частот вращения, поскольку обработка сигнала управления осуществляется в соответствии с сигналами ЭЦМ и любое отклонение от этих сигналов автоматически компенсируется. Контур начальной синхронизации позволяет устранить недопустимые рывки динамического момента во время включения питания при частоте вращения ротора УДМ, отличной от нулевой. Этот эффект имеется и при переключении электропривода с основного канала управления на резервный. Кроме того, устранена ступенчатость переходного процесса установления динамического момента. За счет применения двойного интегрирования в ЭЦМ УДМ порядок астатизма системы управления динамическим моментом повышается до второго, что позволяет существенно повысить ее точность. В случае управления ПВР система также является астатической и имеет первый порядок. Для улучшения динамики системы и обеспечения требуемых параметров быстродействия и перерегулирования ток двигателя формируется не только из сигнала рассогласования между координатами ЭЦМ и двигателя, но и сигнала, пропорционального коду управления. При такой структуре контур с ЭЦМ выполняет функцию коррекции токов двигателя с целью достижения синхронности сигналов ЭЦМ и ДПР в то время, как сигнал, пропорциональный коду управления, задает основное значение тока в фазах двигателя.

Выводы

1. Разработанная система управления бортовыми электроприводами СОС КА позволяет существенно повысить качество статических и динамических характеристик электромеханических исполнительных органов.

2. Система управления динамическим моментом УДМ обладает рядом преимуществ по сравнению с применяемой в настоящее время разомкнутой системой регулирования электромагнитного момента двигателя, а именно:

- достигнута практически полная компенсация момента сопротивления и момента трогания;
- обеспечена высокая стабильность крутизны моментно-регулирующей характеристики во всем диапазоне частот вращения и ее малое значение погрешности (<0,3%);
- получена возможность создавать даже очень малые динамические моменты;
- полученная стабильность частоты вращения позволяет формировать кинетический момент с высокой точностью;
- обеспечены высокие показатели качества динамики системы (без учета времени начальной синхронизации).

С другой стороны, к недостаткам рассмотренной системы управления можно отнести:

- необходимость начальной синхронизации ЭЦМ с реальными координатами двигателя – частотой вращения и угловым положением вала;
- большой объем цифровой обработки сигналов и, как следствие, потенциальное снижение надежности системы при работе в жестких условиях космической радиации, необходимость резервирования.

3. В ходе экспериментальных исследований доказано, что работа системы управления, направленной на компенсацию фазного рассогласования между моделью и ДПР электродвигателя, является адекватной. Для оценки пульсаций фактического управляющего момента как УДМ, так и гиродина необходимо провести дополнительные испытания на стенде для измерения малых моментов.

Литература

1. А.с. 1840286 СССР, МПК Н 02 Р 7/28. Устройство управления двигателем-маховиком / В.П. Лянзбург, А.К. Зенков. (СССР). – №2215375/09; заявл. 07.01.1977; опубл. 27.08.2006. Бюл. № 36. – 4 с.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
3. Пат. 2 291 552 РФ, МПК Н 02 Р 6/08. Устройство для регулирования частоты вращения электродвигателя / Ю.Е. Муравяткин, С.В. Редькин, А.С. Авдиевич (РФ). – № 2 004 132 669/09; заявл. 09.11.2004; опубл. 10.01.2007. Бюл. № 16. – 3 с.
4. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/gost/gost5922.html>, свободный (дата обращения: 20.06.2014).
5. Захаров А.В. Алгоритмы CORDIC. Современное состояние и перспективы / А.В. Захаров, В.М. Хачумов // Программные системы: теория и приложения. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 353–372.

6. Цифровой следящий электропривод высокоточных лазерных станций координатных измерений / А.П. Балковой Ю.Н. Бугаев, А.В. Суетенко, В.К. Цаценкин // Электричество. – 2004. – № 5. – С. 37–43.

Балковой Николай Николаевич

Аспирант каф. ПрЭ ТУСУРа, инженер-электроник 1-й кат. ОАО «НПЦ «Полус»
Тел.: +7-923-401-43-91
Эл. почта: balkovoy.nn@gmail.com

Муравяткин Юрий Ефимович

Ведущий инженер-конструктор ОАО «НПЦ «Полус»
Эл. почта: polus@online.tomsk.net

Лянзбург Владимир Петрович

Канд. техн. наук, начальник отдела, зам. главного конструктора ОАО «НПЦ «Полус»
Эл. почта: polus@online.tomsk.net

Михальченко Геннадий Яковлевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ПрЭ ТУСУРа, директор ООО «Компания «Промышленная электроника»
Тел.: 8-913-826-09-07
Эл. почта: kre-tusur@yandex.ru

Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E., Lyanzburg V.P., Mikhailchenko G.Ya.

Digital astatic electric drive of the spacecraft orientation and stabilization system

This paper presents the features of the designing control systems for high-precision electric drives of the power gyroscopic devices – reaction wheels and control moment gyroscopes. The accuracy and dynamic performance are improved by applying the principle of phase synchronization, etalon digital model in the control loop and the use of high-performance digital computing systems. The block diagram, its description and experimental results are presented in the paper.

Keywords: reaction wheel, control moment gyroscope, dynamic torque, etalon digital model, frequency-phase discriminator, permanent magnet synchronous motor, orientation and stabilization system of the spacecraft.
