

## МОМЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗБЫТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ

А.Д. Беленький, В.Н. Васильев, В.В. Каверин, М.Е. Семенов  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Приводятся результаты испытаний маховичной системы, в состав которой входят шесть электродвигателей-маховиков постоянного тока ДМ1-20. Система предназначена для управления ориентацией малого космического аппарата.

**Ключевые слова:** космический аппарат, двигатель-маховик, маховичная система, алгоритм управления, силоизмерительная платформа.

Приводятся экспериментальные моментные характеристики системы шести электродвигателей-маховиков ДМ1-20. Работа является продолжением исследований избыточных маховичных систем [1]. Электромеханический комплекс входит в состав экспериментальной системы ориентации (ЭСО) и предназначен для управления ориентацией малых космических аппаратов.

**Схема установки двигателей-маховиков.** Схемы установки избыточных систем двигателей-маховиков (ДМ) и их обобщённые динамические характеристики обсуждаются в [2]. С учётом высокой надёжности ДМ их число  $n$  в избыточных системах варьируется от четырёх до шести. При  $n = 6$  оси вращения маховиков предлагается устанавливать ортогонально боковым граням правильной шестигранной пирамиды. Выбором угла при вершине пирамиды можно оптимизировать область изменения вектора кинетического момента системы маховиков, исходя из тактико-технических требований к угловым маневрам и стабилизации космического аппарата (КА). Например, если требуются программные повороты КА по одной из осей стабилизации, то уменьшая угол при вершине пирамиды, можно вытянуть область изменения вектора кинетического момента вдоль оси пирамиды, а затем совместить ось пирамиды с осью программного поворота.

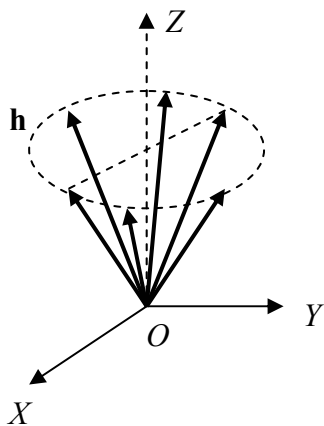


Рис. 1. Схема установки

Установочные векторы  $\mathbf{h}_i$ , параллельные осям вращения ДМ, равномерно располагаются на правильной круговой конической поверхности с вершиной в точке  $O$ . Для определенности считаем, что ось симметрии конуса совпадает с осью  $OZ$  – осью программного поворота (рис. 1). Концы векторов  $\mathbf{h}_i$ ,

расположенные на круговом основании конуса, являются вершинами вписанного в основание правильного шестиугольника.



Рис. 2. Маховичная система

Если угол при вершине в осевом сечении конуса выбран равным  $120^\circ$ , управляющие моменты маховичной системы по осям КА  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  могут изменяться, соответственно, в диапазонах  $\pm 3m_*$ ,  $\pm 3,46m_*$  и  $\pm 3m_*$ , где  $m_*$  – максимальный управляющий момент одного ДМ.

ДМ могут устанавливаться в разных местах КА при выполнении условия: ось вращения  $i$ -го маховика должна быть параллельна соответствующему установочному вектору  $\mathbf{h}_i$ . В исследуемой системе ДМ расположены на двух подставках (рис. 2). На одной подставке установлены двигатели-маховики с нечётными номерами, на другой – с чётными.

**Алгоритм управления.** Алгоритмы управления избыточной системой ДМ произвольного вида разработаны в [3], алгоритмы управления системой шести ДМ проверены на математических моделях.

Пусть  $m_i$  ( $i = 1 - 6$ ) – требуемые управляющие моменты ДМ;  $\mathbf{M}$  – вектор управляющего момента маховичной системы;  $\mathbf{M}_{КА}$  – требуемый вектор управляющего момента КА. Задача управления избыточной маховичной системой заключается в на-

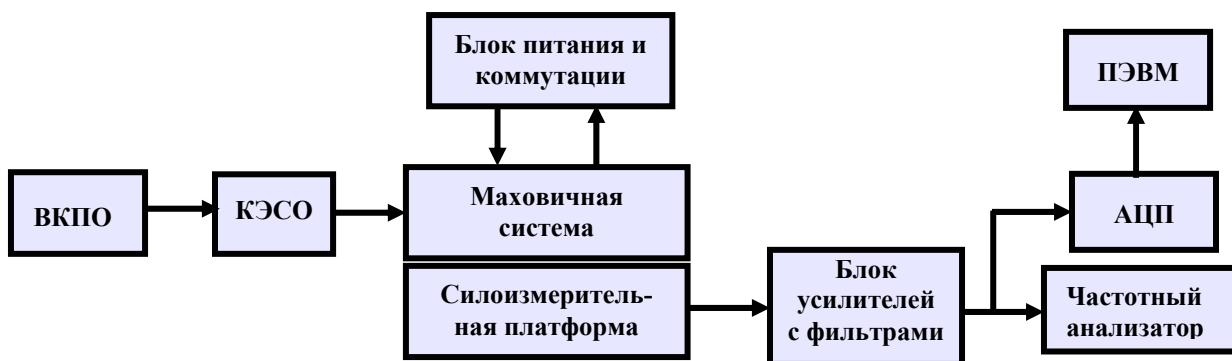


Рис. 3. Блок-схема стенда динамических испытаний

хождении управляющих моментов ДМ  $m_i$ , обеспечивающих равенство  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{КА}$ .

Для управления минимально избыточной системой использовался алгоритм, минимизирующий сумму квадратов управляющих моментов маховиков [1, 4]:

$$J = \sum_{i=1}^4 m_i^2.$$

Современные электродвигатели-маховики на базе бесконтактных двигателей постоянного тока обладают свойством рекуперации электроэнергии [5, 6]. Целенаправленное использование этого свойства открывает перспективы совершенствования энергетических показателей маховичной системы.

В качестве критерия оптимальности маховичной системы используем сумму взвешенных квадратов управляющих моментов маховиков [3]:

$$J = \sum_{i=1}^6 V_i m_i^2,$$

где  $V_i$  – весовая функция  $i$ -го маховика.

Для выбора весовой функции использовались экспериментальные зависимости тока потребления электродвигателя-маховика ДМ1-20 [3].

Алгоритм управления обладает важным свойством: последовательность выполняемых операций и общая структура, принятые в штатном режиме, сохраняются неизменными при отказах ДМ. Меняются только параметры вычислительного процесса. Достаточно обнулить в расчётных формулах направляющие косинусы установочных векторов  $\mathbf{h}$ , отказавших ДМ.

**Схема эксперимента.** Испытываемая маховичная система (блок электромеханики) состоит из шести ДМ и двух механических адаптеров – подставок. Оси координат подставок совпадают со связанными осями КА.

Цель экспериментов – комплексная оценка управляющих возможностей избыточной системы ДМ. Проверка охватывает работу трех каналов стабилизации, включая логику управления ДМ штатным контроллером ЭСО. Для проведения комплексных экспериментов создан стенд динамических испытаний. В его состав входят контроллер экспериментальной системы ориентации (КЭСО), вычислительный комплекс программного

обеспечения (ВКПО), силоизмерительная платформа Kistler типа 9281В с блоком электроники, персональная ЭВМ с платой аналого-цифрового преобразования (АЦП), узкополосный частотный анализатор «Брюль и Кьер» типа 2033, блок питания и коммутации. Блок-схема стенда динамических испытаний изображена на рис. 3. Новый стенд отличается от аналогичного стенда для испытаний системы четырёх ДМ составом программно-аппаратного комплекса, предназначенного для реализации алгоритмов управления маховичной системы. В новом стенде для реализации алгоритмов управления маховичной системой в штатном режиме, при отказах и тестировании ДМ используется КЭСО, в котором установлено бортовое программное обеспечение. В КЭСО вырабатываются управляющие ШИМ-сигналы, подаваемые на входы шести ДМ. Предписание на реализацию режимов ориентации выдаётся ВКПО.

Силовой измерительная платформа, установленная на виброизолированном фундаменте, обеспечивает измерение компонент вектора управляющего момента маховичной системы относительно системы трех ортогональных осей. Измерительные сигналы пьезоэлектрических датчиков платформы поступают в блок усилителей заряда, содержащих полосовые фильтры, а затем на многоканальную плату АЦП компьютера. Сбор и обработку измерительной информации осуществляет специальное программное обеспечение.

Изучение управляющих свойств маховичной системы производилось путем измерения и обработки временных зависимостей крутящих моментов, создаваемых относительно трех осей платформы. Для контроля величин крутящего момента по одной из осей и оперативного выявления его частотных составляющих используется узкополосный частотный анализатор «Брюль и Кьер» типа 2033.

Блок питания и коммутации предназначен для подключения блока электромеханики к сети, включения и отключения отдельных ДМ.

Входными переменными стенда являются параметры требуемого управляющего момента маховичной системы относительно заданной оси КА. Амплитуда и частота управляющего момента, но-

мер оси КА, номер тестируемого ДМ и время испытаний задаются с клавиатуры ВКПО и выводятся для контроля на экран дисплея.

Выходными переменными стенда являются компоненты вектора управляющего момента маховичной системы относительно трех осей силоизмерительной платформы, регистрируемые в виде временных процессов в запоминающем устройстве ПЭВМ.

**Результаты экспериментов.** Методика экспериментов основана на использовании штатного «экспериментального режима» работы бортового программного обеспечения ЭСО КА «Метеор-М» №1. Этот режим реализуется КЭСО по предписанию наземного комплекса управления (НКУ), который должен выдавать в КЭСО параметры требуемого управляющего момента по любой оси КА. В стенде параметры «экспериментального режима» (желаемая ось КА, амплитуда и частота требуемого управляющего момента синусоидальной формы) задавались при помощи ВКПО. Аналогично реализовывалось требование НКУ на проведение теста выбранного ДМ.

Чтобы уменьшить влияние помех регистрирующих устройств силоизмерительной платформы, результаты измерений подвергались математической обработке [1].

В процессе испытаний требуемые моменты задавались по каждой из трех осей стабилизации КА в диапазоне частот от 0,1 до 2 Гц. Поскольку требуемый момент задается по одной оси КА, моменты, регистрируемые по двум другим осям, характеризуют наличие перекрестных связей между каналами стабилизации. Причиной перекрестных связей могут быть погрешности изготовления механических адаптеров-подставок, неточности установки подставок с ДМ на силоизмерительной платформе, ошибки алгоритма управления и программного обеспечения.

Установлено, что сигналы, регистрируемые по поперечным осям, слабо зависят от амплитуды требуемого момента. Это говорит о том, что сигналы по поперечным осям не связаны с наличием перекрестных связей между каналами стабилизации. Фактические моменты, действующие по поперечным осям, малы и по этой причине практически не различимы на фоне помех измерительной системы.

Проверялось функционирование системы при откате одного ДМ с произвольным номером. При этом появление перекрестных связей между каналами стабилизации также не наблюдалось. Измеряемые моменты по оси ОУ при задании требуемого момента с амплитудой 0,025 Н·м и частотами 0,56 и 1 Гц изображены, соответственно, на рис. 4, 5. Измеряемые моменты отличаются от синусоидальной формы наличием «выбросов», возникающих при изменении знака требуемого момента.

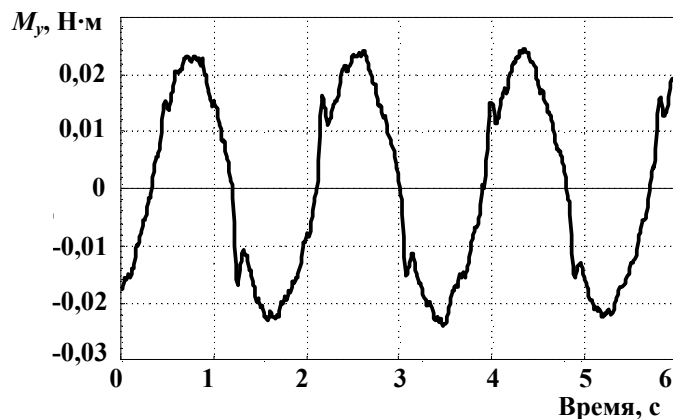


Рис. 4. Управляющий момент маховичной системы по оси ОУ при частоте 0,56 Гц

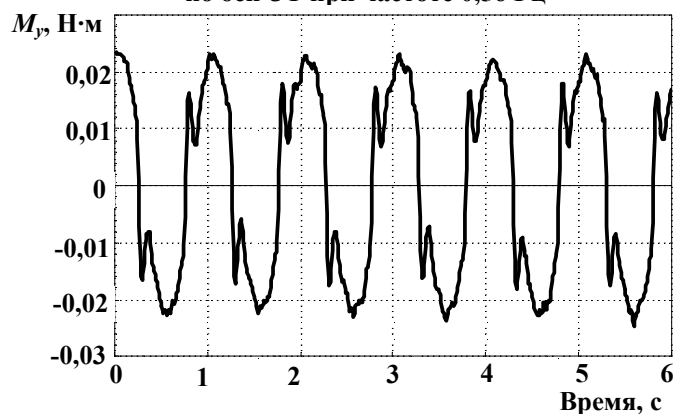


Рис. 5. Управляющий момент маховичной системы по оси ОУ при частоте 1 Гц

Математическое моделирование с использованием уточнённой математической модели ДМ, проводимое одновременно с экспериментами, показало, что наличие «выбросов» связано с процедурой обработки ШИМ-сигналов на входе ДМ. ШИМ-сигнал характеризуется периодом опорных импульсов и временным интервалом  $\tau$ . Величина  $\tau$  пропорциональна абсолютному значению требуемого управляющего момента. Для положительных и отрицательных моментов используются разные информационные линии связи, при этом задержка информационных импульсов относительно опорных равна  $\tau$ .

Коммутатор обеспечивает включение и отключение секций обмотки двигателя по сигналам датчика углового положения с учётом знака сигнала управления, т. е. номера используемой линии связи. Регулятор тока, питающий обмотку двигателя, обладает инерционностью, поэтому при смене знака сигнала управления возникают «броски» тока.

Сравнение процессов на рис. 4 и 5 и результатов моделирования показывает, что влияние инерционности регулятора возрастает при увеличении частоты требуемого управляющего момента. На низких частотах, соответствующих полосе пропускания замкнутой системы ориентации, это влияние минимально.

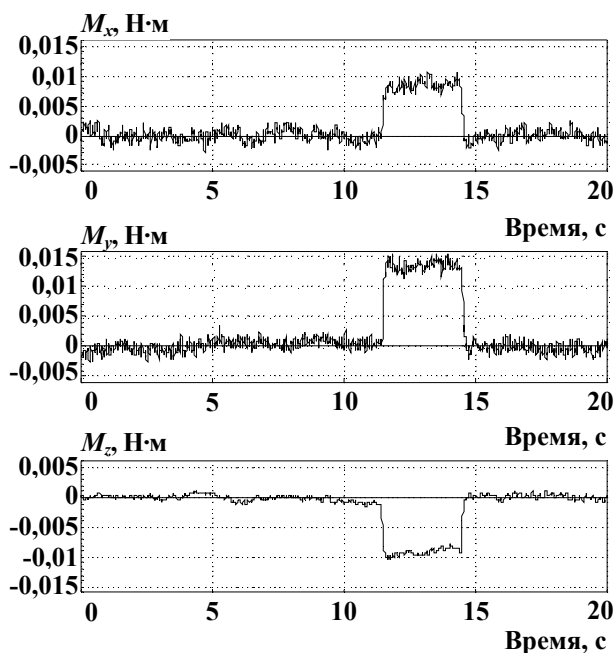


Рис. 6. Управляющий момент одного ДМ

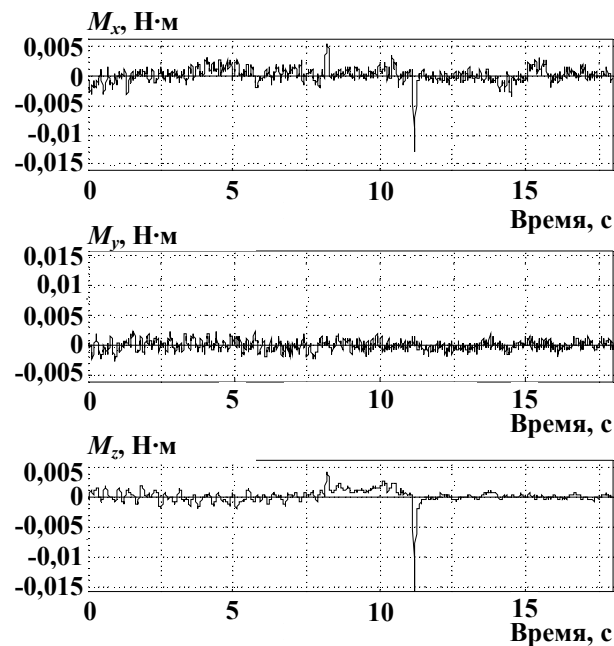


Рис. 7. Управляющие моменты маховичной системы при тестировании ДМ

Перед проверкой «режима тестирования», предусмотренного штатным алгоритмом управления, контролировались моменты, создаваемые по осям стабилизации выбранным для тестирования ДМ. По оси OZ в течение трёх секунд задавался постоянный управляющий момент, близкий к максимальному. Все ДМ, кроме одного, были выключены. Работающий ДМ создаёт по осям стабилизации управляющие

моменты, определяемые алгоритмом управления и направляющими косинусами оси вращения (рис. 6).

В режиме тестирования возмущающий момент, создаваемый ДМ при тестировании, компенсируется управляющими моментами других ДМ. В алгоритме реализуется принцип управления «по возмущению». В идеальном случае тестирование ДМ не должно влиять на динамику стабилизации КА.

В режиме тестирования на проверяемый ДМ через 8 с после начала эксперимента в течение 3 с подаётся сигнал на создание максимального управляющего момента. Изменялись моменты, создаваемые маховичной системой по осям стабилизации (рис. 7). Сравнение рис. 6 и 7 показывает, что возмущающие моменты возникают только в начале и конце тестирования и действуют только в течение одного такта управления. Аналогичная проверка проводилась при имитации отказов ДМ. Проведённые исследования позволили оценить эффективность разработанных алгоритмов управления и программного обеспечения КЭСО, работу интерфейсных модулей КЭСО с драйверами и избыточной маховичной системы в целом.

**Заключение.** Выполненные эксперименты подтвердили работоспособность алгоритмов управления маховичной системой и программного обеспечения КЭСО в штатном режиме, при отказах ДМ и тестировании. Перекрестные связи между каналами стабилизации не заметны на уровне шумовых помех. Механические адаптеры-подставки реализует схему установки ДМ на МКА с заданной точностью. Динамические свойства маховичной системы обеспечивают создание быстродействующих систем ориентации. По результатам испытаний рекомендована доработка регуляторов тока ДМ в части снижения постоянной времени. Уточнена математическая модель ДМ.

### Литература

1. Моментные характеристики минимально избыточной системы электродвигателей-маховиков / А.Н. Аронзон, А.Д. Беленький, В.Н. Васильев [и др.] // Труды ВНИИЭМ. – М., 2005. – Т. 102. – С. 116 – 125.
2. Исследование свойств избыточных систем электродвигателей-маховиков / А.Д. Беленький, В.Н. Васильев, М.Ю. Лебедева [и др.] // Труды ВНИИЭМ. – М., 2005. – Т. 102. – С. 93 – 106.
3. Беленький А.Д. Управление избыточной системой электродвигателей-маховиков / А.Д. Беленький, В.Н. Васильев, М.Е. Семенов // Труды ВНИИЭМ. – М., 2005. – Т. 102. – С. 107 – 115.
4. Беленький А.Д. Управление минимально избыточной системой электродвигателей-маховиков / А.Д. Беленький, В.Н. Васильев. – М.: Известия РАН. МТТ, 1996. – № 2. – С. 75 – 81.
5. Электродвигатель-маховик постоянного тока / В.Я. Журавлев, В.Н. Кузьмин, Е.М. Михайлов [и др.] // Труды ВНИИЭМ – М., 1985. – Т. 78. – С. 67 – 74.
6. Российский космический бюллетень. – 1998. – Т. 5. – № 4.

*Арон Давидович Беленький, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-21-22.  
Владимир Николаевич Васильев, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, т. 366-21-22.  
Владимир Викторович Каверин, мл. научн. сотрудник, т. 8-926-225-33-21.  
Максим Евгеньевич Семенов, ведущий инженер, т. 366-21-22.  
E-mail: vniiem@vniiem.ru.*