

ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА ДЛЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. В. Некрасов

Сформулирована постановка задачи по поиску функции управления в режиме заданной скорости вращения ротора двигателя-маховика. Построена математическая модель функции управления двигателя-маховика в режиме заданной скорости вращения ротора для высокودинамичных космических аппаратов в реальном масштабе времени. Найденная функция управления двигателем-маховиком состоит из трех декомпозиционных слагаемых этапов. Для решения задач каждого этапа были предложены и применены различные оптимальные методы (метод Эйлера, метод наименьших квадратов, двухпозиционный и пропорционально-интегральный законы регулирования). Изложены предлагаемые варианты оптимизации построенной ранее математической модели, направленные на исследование задачи максимизации функции управления двигателя-маховика в режиме заданной скорости вращения ротора для высокودинамичных космических аппаратов в реальном масштабе времени. Осуществлены натурные испытания полученной оптимизированной функции управления, сделаны выводы и даны рекомендации о возможном внедрении проделанного исследования.

Ключевые слова: двигатель-маховик, микроконтроллерная система управления, высокودинамичные космические аппараты, функция управления скоростью, оптимизация математической модели.

Введение

Выполнение функциональных назначений космического аппарата (КА) требует возможностей изменения углового положения КА в орбитальной системе координат. 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. В качестве ИО СОС КА применяют двигатели-маховики (ДМ).

Появление радиационно стойкой микроконтроллерной техники открыло новые возможности в управлении ДМ и инициировало на базе АО «Корпорация «ВНИИЭМ» создание нового ДМ с микроконтроллерным управлением (ДМ-МК) в режиме по скорости вращения ротора. Данная разработка осуществляется с помощью научного метода в рамках диссертационной работы: «Микроконтроллерная система управления двигателем-маховиком для высокودинамичных космических аппаратов».

Построение концептуальной модели для решения поставленных задач

Для осуществления натурного моделирования создан макет ДМ-МК. За основу создания концептуальной модели взята аналоговая схема ДМ, разработанного и выпускаемого АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (ДМ20-250), маховичный электропривод которого выполнен на основе бесконтактного электродвигателя постоянного тока (БДПТ) [1]. В БДПТ задача управления вращающим моментом

сводится к управлению током в якорной обмотке, поскольку магнитный поток, возбуждаемый магнитами, практически постоянен [2]. В схеме управление уровнем тока в обмотке двигателя осуществляется регулятором тока, работающим в режиме широтно-импульсной модуляции по внешнему управляющему сигналу, формируемому микроконтроллерным модулем (МКМ) [3, 4].

Для организации обратной связи по скорости вращения ротора ДМ-МК в схему электромеханического блока (ЭМБ) введен оптоэлектрический датчик скорости [5], 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. 1).

МКМ разработан на базе применяемого в изделиях АО «Корпорация «ВНИИЭМ» унифицированного микроконтроллерного модуля управления для систем ориентации солнечных батарей (СОСБ) КА [6].

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 бортового комплекса управления (БКУ) КА по мультиплексному каналу обмена (МКО), ГОСТ 52070-2003;
- 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 решаемой задачи

Дано: основные технические характеристики ДМ-МК (табл. 1) и требования к допустимому отклонению

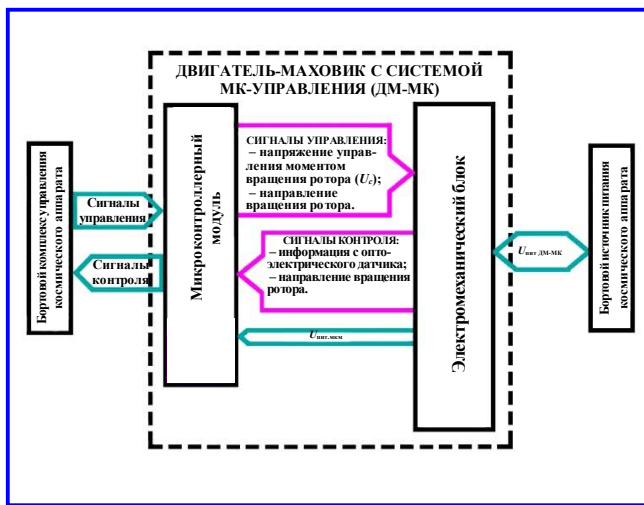


Рис. 1. Структурная блок-схема ДМ-МК

частоты вращения ротора в режиме управления по скорости ДМ-МК (табл. 2). Найти: функцию управления ДМ-МК в режиме заданной скорости вращения ротора для высокодинамичных КА.

Для поиска функции управления ДМ-МК в режиме заданной скорости были проанализированы внутренние связи и воздействующие факторы (рис. 2). Отметим, что поиск осуществлялся для всего рабочего диапазона скоростей вращения ротора, где величина момента сопротивления (M_c), наличие которого обусловлено различными факторами (в том числе моменты трения подшипников, изменяющиеся свойства смазок, термические процессы в конструкции и т. д.), для разных скоростей различна. Поэтому в решаемой задаче необходимо учитывать нелинейность данной системы, обусловленной изменением электромеханических характеристик во всем скоростном диапазоне в течение всего срока жизни изделия.

Формулировка концепции создания микроконтроллерной системы управления ДМ-МК для высокодинамичных КА

Концепция создания микроконтроллерной системы управления ДМ-МК в режиме управления по скорости вращения ротора ориентирована на обеспечение характеристик ДМ-МК, как исполнительных органов СОС высокодинамичного КА. Эта концепция подразумевает

Таблица 1

Основные технические характеристики ДМ-МК

Управляющий момент (M_y), Н·м	1
Кинетический момент (M_k), Н·м·с	±10
Диапазон изменения частоты вращения, об/мин	±1360
Максимальный потребляемый ток, А	10
Число импульсов на оборот ($N_{i/rot}$), шт.	1360
Погрешность значения количества импульсов за оборот (N_e), шт.	±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 ² (вариант В), об/мин	не более 2
При темпе изменения заданной частоты вращения в диапазоне от 1000 до 8000 об/мин ² (вариант С), об/мин	не более 10

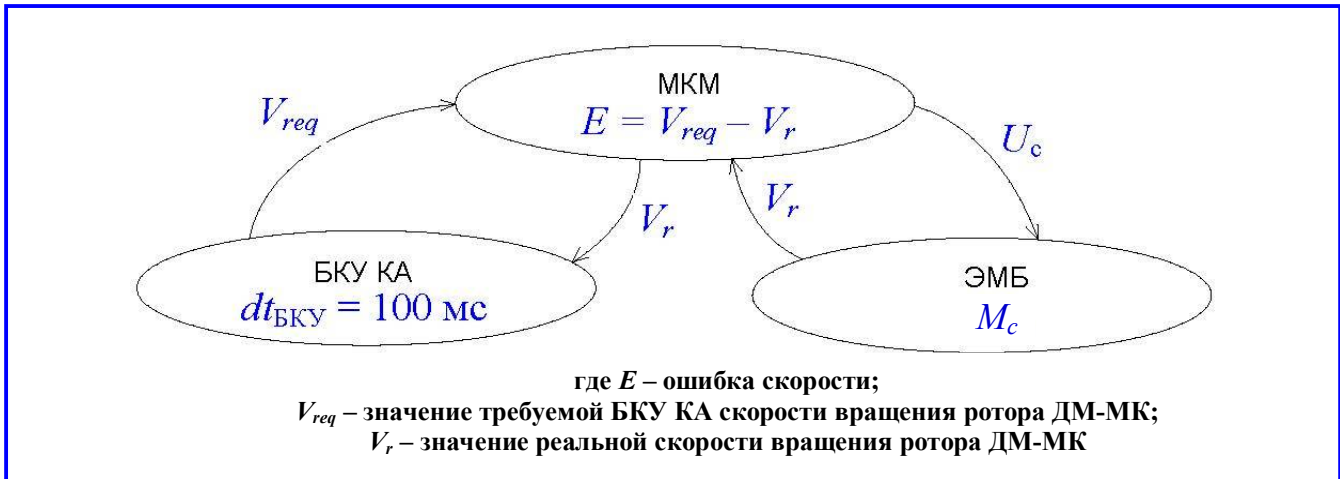


Рис. 2. Функциональная блок-схема причинно-следственных связей для построения математической модели

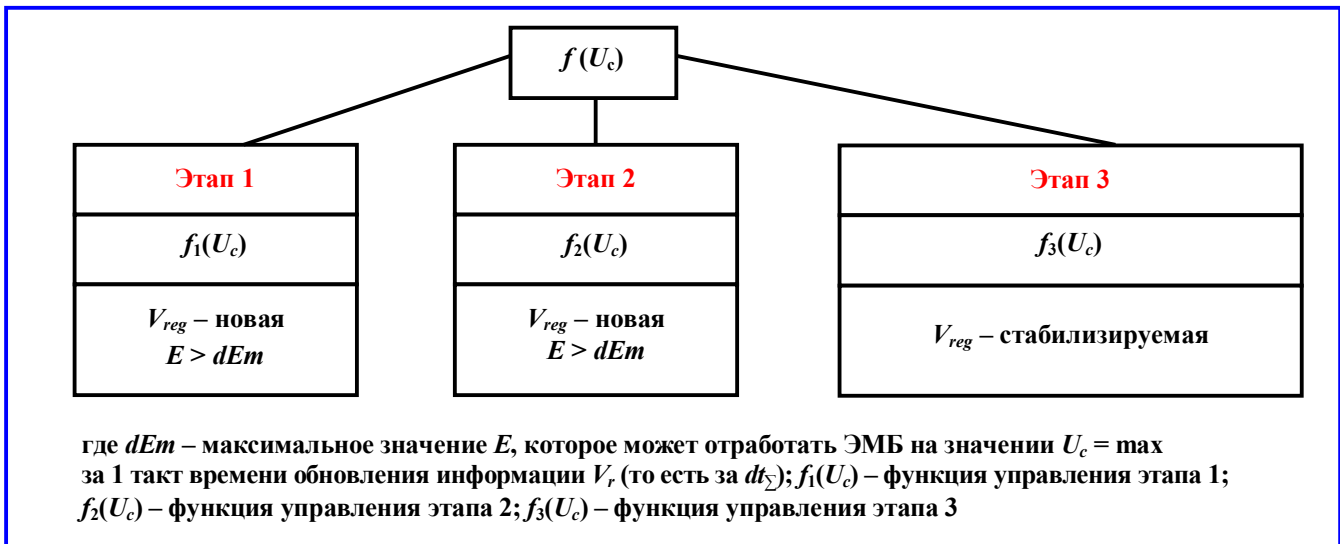


Рис. 3. Декомпозиция функции управления ДМ-МК на слагаемые этапы

осуществление максимально допустимого быстрого действия вращения КА вокруг центра масс и его высокоточную стабилизацию за минимальное время. Таким образом все режимы управления высокодинамичным КА, обеспечиваемые СОС КА, можно разделить по двум критериям:

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

Построение математической модели для решения научной задачи

Функция управления процесса выхода и поддержания устойчивого значения требуемой скорости с необходимой погрешностью за максимально

краткое время во всем диапазоне требуемых скоростей декомпозирована на три этапа (рис. 3). Каждый этап выполняет свою задачу, требующую частного подхода и методологии решения. Отметим, что значения контролируемой ошибки скорости (E), определяют номер этапа [7].

В рамках построения математической модели были определены задачи декомпозиционных этапов и методы их решения с помощью методологии теории автоматического управления (ТАУ) [8] с применением различных математических методов.

Этап 1

Задача: максимально быстрое уменьшение значения E до значения времени (t_{a1}), с которого будет выполняться задача этапа 2 (рис. 4).

Критерий эффективности – быстроедействие.

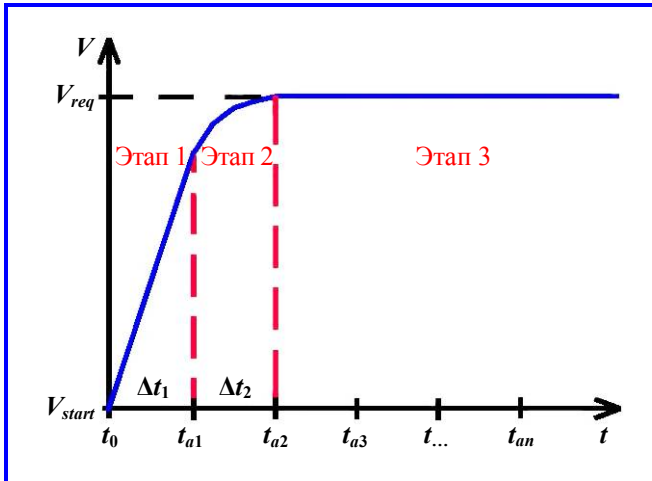


Рис. 4. Этапы выхода и стабилизации новой требуемой скорости вращения ротора ДМ-МК

Этап 1 предлагается решить с помощью двухпозиционного [в разных источниках также имеет следующие названия: старт-стопное регулирование [9], релейное регулирование (при наличии в схеме реле) [10] и др.] закона регулирования.

Этап 2

Задача: максимально точный выход на значение V_{req} (рис. 4) за время $\Delta t_2 [t_{a1}; t_{a2}] \leq \Delta t_{БКУ}$ (100 мс, табл. 1). Отработка данного этапа начинается, как только вступают в силу условия этапа 2 (рис. 2).

Критерий эффективности – точность с ограничением по критерию быстродействия (в рамках значения $\Delta t_{БКУ}$, табл. 1)

Методология решения задачи этапа 2 была представлена обыкновенным дифференциальным уравнением (ОДУ) [11, 12] и решена численным методом Эйлера.

Этап 3

Задача: поддержание значения V_{req} в рамках допустимых требований (табл. 2).

Критерий эффективности – точность.

Методологию решения задачи этапа 3 представим двумя подзадачами:

1. Контролем отклонения от значения V_{req} (решение было представлено с помощью математического метода наименьших квадратов (МНК) [13]);

2. Компенсацией отклонения от значения V_{req} , то есть выполнением требований к допустимому отклонению частоты вращения ротора в режиме управления по скорости вращения ротора ДМ-МК при неизменной заданной частоте (табл. 2, вариант А, стабилизация V_{req}).

Отметим, что при стабилизации V_{req} на значение скорости вращения ДМ влияет M_c , обусловленный

тормозными моментами различного свойства (тормозные моменты подшипников, изменяющиеся свойства смазок и т. д.), приводящие к отклонениям от V_{req} , поэтому необходимо формировать компенсирующее их управляющее воздействие.

Решение второй подзадачи этапа 3 было представлено с помощью пропорционально-интегрального закона регулирования (ПИ-регулирования).

Постановка задачи по оптимизации математической модели

По итогам построения математической модели функции управления ДМ в режиме заданной скорости вращения ротора для высокодинамичных КА в реальном масштабе времени была выполнена поставленная задача, но не на максимизирующих характеристиках выхода на значение V_{req} . Поэтому в данной статье проведен анализ декомпозиционных слагаемых этапов с целью поиска вариантов оптимизации по критериям быстродействия и точности (рис. 4).

Оптимизация построенной математической модели для решения научной задачи

Включает в себя исследование декомпозиционных слагаемых этапов построенной математической модели (рис. 3) на предмет возможной оптимизации.

На первом этапе (этап 1) возможность оптимизации отсутствует, так как этап выполнен на максимизирующем значении функции управления ДМ-МК ($U_c = \max$, для этапа 1), что соответствует концепции управления высокодинамичным КА.

При поиске решения задачи этапа 2, воспользовавшись разложением функции в бесконечную сумму степенных функций с помощью ряда Тейлора, было найдено универсальное решение (численным методом Эйлера) для темпов изменения заданной частоты вращения (варианты В и С, табл. 2).

Для выполнения этапа 2 на максимизирующем значении функции управления ДМ-МК предлагается осуществлять анализ заданного БКУ КА темпа изменения заданной частоты вращения (вариант В или С, табл. 2), в соответствии с которым будет применен оптимальный численный метод решения точного выхода на V_{req} с учетом заданных ограничений (табл. 2).

Определим численный метод вычисления ОДУ для решения задачи оптимизации этапа 2 (табл. 2). Воспользуемся методологией определения численного метода вычисления ОДУ [7]. Данное ОДУ имеет одну независимую переменную – U_c , это связано с тем, что переход с этапа 1 на этап 2 осуществляется на значении $U_c = \max$, следова-

тельно, переменной значения M_c можно пренебречь, так как значение M_c учтено при корректировке значения ΔE_m на этапе 1 (в случае рассмотрения значения M_c , как еще одной переменной, методология решения была бы представлена дифференциальными уравнениями в частных производных). Таким образом, решим ОДУ с начальными условиями (рис. 2, табл. 1 и 2), то есть решим задачу Коши.

Спрогнозируем точный выход на значение V_{req} , чтобы по итогам отработки $\Delta t_{БКУ} = 100$ мс значение $E = 0$. Воспользуемся разложением функции в бесконечную сумму степенных функций с помощью ряда Тейлора.

Определение: многочленом Тейлора функции $f(u)$ вещественной переменной u , дифференцируемой k раз в точке t , называется конечная сумма:

$$\sum_{n=0}^k \frac{f^{(n)}(t)}{n!} (u-t)^n = f(t) + f'(t)(u-t) + \frac{f^{(2)}(t)}{2!} (u-t)^2 + \dots + \frac{f^{(k)}(t)}{k!} (u-t)^k.$$

Рассчитаем минимальное время одной дифференциализации (Δt_d), определив цену значения $E1$ не более 1,0 имп./об. (в поиске решения этапа 2, при построении математической модели, цена значения $E1$ была принята не более 0,5 имп./об.). Численно значение Δt_d будет определено по следующей формуле:

$$\Delta t_d = \frac{1}{N_{i/rm} E1} = \frac{1}{22,667 \cdot 1,0} = 0,04412 \text{ с.}$$

Таким образом, для обеспечения всех дифференциализаций за $\Delta t_{БКУ}$ (100 мс) необходимо принять $k = 2$. Следовательно, максимизирующим численным методом вычисления обыкновенного дифференциального уравнения решаемой задачи этапа 2 для обеспечения максимальной аппроксимации $f(u)$ будет модифицированный метод Эйлера.

На рис. 5 представлены варианты аппроксимации функции управления ДМ-МК, где функция $f_{a2}(U_c)$ является более близкая к идеальной функции $f_i(U_c)$ управления этапа 2.

Для отработки функции управления модифицированным методом Эйлера и обеспечения $E = 0$ выполняем расчет:

$$U_{c1} = \frac{U_{cm} \cdot E}{\Delta E_m},$$

где U_{c1} – аналоговое управляющее напряжение в первый цикл дифференцирования.

$$U_{c2} = \frac{U_{cm} \cdot E}{\Delta E_m},$$

где U_{c2} – аналоговое управляющее напряжение во второй цикл дифференцирования.

$$U_c = U_{c0} + \frac{dt}{2}(U_{c1} + U_{c2}),$$

где $dt_{\Sigma} = 0,08824$ с (общее время двух дифференциализаций).

Дальнейшее понижение значения $E1$, с целью повышения количества дифференциализаций, ведет к повышению суммарной погрешности в определении значения V_r , что не дает выполнить требования табл. 2.

Этап 3 выполнен на максимизирующем значении функции управления ДМ-МК без учета изменяющегося в течение срока эксплуатации изделия значения M_c . При переходе на этап 3 для нейтрализации перерегулирования, вызванного временем формирования (Δt_{Mc} , рис. 6) ПИ-регулятором компенсирующего значения M_c , соответствующего V_{req} , предлагается создать соответствующую методологию управления ДМ-МК.

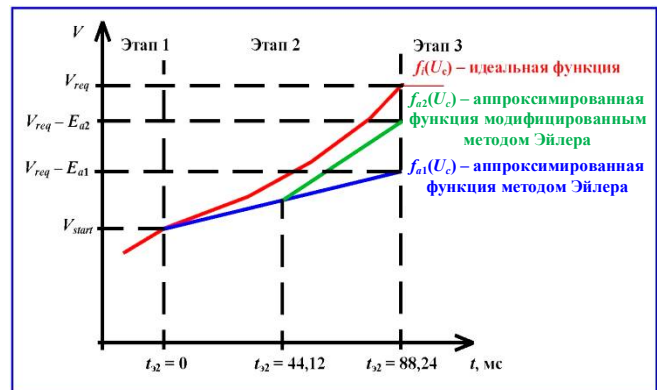


Рис. 5. Геометрическое представление аппроксимации функции управления ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротора

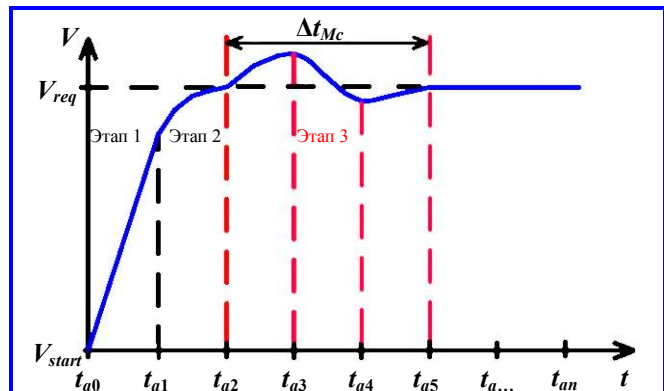


Рис. 6. Перерегулирование, вызванное временем формирования ПИ-регулятором компенсирующего значения M_c , соответствующего значению V_{req}

Таблица 3

Значение скорости вращения ротора ДМ-МК, об/мин	Значение кода, №
-1300	a_{-1300}
...	...
0	a_0
...	...
+1300	a_{1300}

С помощью метода статистической обработки информации предлагается создание адаптивной матрицы кодов компенсационных значений M_c (табл. 3) для загрузки в начале этапа 3 в интегральную составляющую ПИ-регулирующей функции управления ДМ-МК.

Первичные значения адаптивной матрицы кодов компенсационных значений M_c интегрального звена формируются путем снятия электромеханических характеристик ДМ-МК. Далее в процессе эксплуатации ДМ-МК осуществляется самодиагностика системы, адаптирующая матрицу кодов к изменению нелинейной характеристики M_c ДМ-МК.

Заключение

По итогам проведенной оптимизации математической модели создания микроконтроллерной системы управления ДМ-МК для высокочастотных КА были получены следующие результаты: проанализированы декомпозиционные слагаемые этапов функции управления и предложены пути по оптимизации математической модели микроконтроллерной системы управления ДМ-МК для высокочастотных КА.

В результате оптимизации, построенной ранее математической модели:

– на этапе 2 решение численным методом Эйлера заменено на решение численным модифицированным методом Эйлера;

– на этапе 3 в интегральное звено ПИ-регулирующей функции управления введена загрузка начального значения интеграла из адаптивной таблицы кодов компенсационных значений M_c всего диапазона возможных V_{req} .

Натурные испытания, проведенные на прототипе ДМ-МК, подтвердили эффективность проведенной оптимизации:

– загрузка начального значения интеграла из адаптивной таблицы кодов компенсационных значений M_c обеспечила возможность отработки ПИ-регулирующей функцией на относительно малых коэффициентах усиления пропорционального и интегрального звеньев этапа 3 математической модели без перерегулирований, вызванных несоответ-

ствующим состоянием интегрального звена для подхвата стабилизируемой V_{req} ;

– возросла точность выхода на значение требуемой скорости при переходе с этапа 2 на этап 3 математической модели (на $\approx 30\%$).

В настоящее время осуществляется внедрение оптимизируемой математической модели микроконтроллерной системы управления ДМ-МК в режиме управления скоростью вращения ротора для высокочастотных КА.

Литература

1. Особенности цифрового управления двигателя-маховика АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для высокочастотных космических аппаратов / В. Д. Бабишин, Д. Ю. Дементьев, В. С. Мартынов [и др.] // Космическая техника и технологии. – Королев : РКК Энергия, 2019. – № 2(25) апрель – июнь. – С. 107 – 111.
2. Анучин А. С. Системы управления электроприводами / А. С. Анучин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с. : ил.
3. Фрунзе А. В. Микроконтроллеры? Это же просто! / А. В. Фрунзе, А. А. Фрунзе. – Москва : ООО «ИД СКИ-МЕН», 2003. – 224 с.
4. Тихомиров Э. Л. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ / Э. Л. Тихомиров, В. В. Васильев, Б. Г. Коровин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 320 с.
5. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. – Москва : Эхо, 2013. – 66 с. : ил.
6. Унифицированный модуль управления СОСБ малых КА на основе микроЭВМ / В. В. Некрасов, М. Ю. Щетинин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 107. – С. 46 – 50.
7. 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.
8. Воронов А. А. Теория автоматического управления: учебник для вузов по специальности «Автоматика и телемеханика»: в 2 частях / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1986. Ч. 1 : Теория линейных систем автоматического управления. – 1986. – 367 с., ил. Ч. 2 : Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – 1986. – 504 с.
9. Старт-стопное управление шаговым двигателем на одном шаге без переключения фаз / В. Н. Демкин, Со Лин Маунг // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 1. – С. 19 – 23.
10. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов / В. Н. Васильев. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.

11. Бабенко К. И. Основы численного анализа / К. И. Бабенко. – Москва : Наука, 1986. – 744 с.
12. Эйлер Л. Интегральное исчисление. В 2 томах. Том 1 / Пер. с лат. С. Я. Лурье, М. Я. Выгодский; предисловие М. Я. Выгодский. – Москва : ГИТТЛ, 1956. – 415 с.
13. Дейнер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дейнер, Г. Смит. – Москва : Диалектика, 2007. – 912 с.

Поступила в редакцию 17.12.2019

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

OPTIMIZATION A MATHEMATICAL MODEL OF THE MICROCONTROLLER SYSTEM CONTROL OF THE MOTOR-FLYWHEEL FOR HIGHLY DYNAMIC SPACECRAFT'S

V. V. Nekrasov

The problem of searching for a control function in the mode of a given speed of rotation of the rotor of a motor-flywheel is formulated. A mathematical model of the control function of the motor-flywheel in the mode of a given speed of rotation of the rotor for highly dynamic spacecraft in real time is constructed. The found flywheel engine control function consists of three decomposition stages. Various optimal methods (Euler's method, least squares method, two-position and proportional-integral control laws) were proposed and applied to solve the problems of each stage. The proposed optimization options for the previously constructed mathematical model are presented, aimed at investigating the problem of maximizing the control function of the motor-flywheel in the mode of a given rotor rotation speed for highly dynamic spacecraft in real time. Full-scale tests of the resulting optimized control function were carried out, conclusions were made and recommendations were made about the possible implementation of the study.

Keywords: motor-flywheel, microcontroller system control, highly dynamic spacecraft's, speed control function, optimization of the mathematical model.

References

1. Features of digital control of the flywheel engine of VNIIEM Corporation JSC for highly dynamic spacecraft's / V. D. Babishin, D. Yu. Demytyev, V. S. Martynov [and others] // Space technology and technologies. – Korolev : RSC Energia, 2019. – No. 2 (25) April-June. – P. 107 – 111.
2. Anuchin A. S. Systems control for electric drives / A. S. Anuchin. – Moscow: MEI Publishing house, 2015. – 373 p.
3. Frunze A.V. Microcontrollers? It's easy! / A. V. Frunze, A. A. Frunze. – Moscow: ID SKI-MEN LLC, 2003. – 224 p.
4. Tikhomirov E. L. Microprocessor control of electric drives of CNC machines / E. L. Tikhomirov, V. V. Vasiliev, B. G. Korovin. – Moscow : Mashinostroenie, 1990. – 320 p.
5. Kalachev And Yu. Vector control (practice notes) / J. N. Kalachev. – Moscow: Echo, 2013. – 66 p.
6. Unified control module for small spacecraft based on micro-computers / V. V. Nekrasov, M. Yu. Shechtinin // Questions of electromechanics. Proceedings of NCE VNIIEM. – Moscow: FSUE «NPP VNIIEM», 2008. – Т. 107. – P. 46 – 50.
7. Construction of a mathematical model of the microcontroller control system of the engine-flywheel in the set speed mode using various mathematical methods and laws of regulation / V. V. Nekrasov // Questions of electromechanics. Proceedings of VNIIEM. – Moscow: VNIIEM Corporation JSC, 2019. – Vol. 171. – No. 4. – P. 3 – 8.
8. Voronov A. A. the Theory of automatic control: a textbook for universities in the specialty «Automation and telemechanics»: in 2 parts / N. A. Babakov, A. A. Voronov, A. A. Voronova [and others]; ed. by A. A. Voronov. – 2nd ed., Rev. and DOP. – Moscow : Higher school, 1986. Part 1: Theory of linear automatic control systems. – 1986. – 367 p. Part 2: Theory of nonlinear and special automatic control systems. – 1986. – 504 p.
9. Start-stop stepper motor control at one step without switching phases / V. N. Demkin, So Lin Maung // Information systems and technologies. – 2014. – No. 1. – P. 19 – 23.
10. Vasiliev V. N. orientation Systems of spacecraft / V. N. Vasiliev. – Moscow: Federal state unitary enterprise «NPP VNIIEM», 2009. – 310 p.
11. Babenko K. I. Fundamentals of numerical analysis / K. I. Babenko. – Moscow: Nauka, 1986. – 744 p.
12. Euler L. Integral calculus. In 2 volumes. Volume 1. – Moscow : GITTL, 1956. – 415 p.

13. Deiner N. Applied regression analysis / N. Deiner, G. Smith. – Moscow: Dialectics. 2007. – 912 p.

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