

УДК 621.3.032.269.2:621.313.84-56

С.С. ПОПОВ, студент гр. 5АМ16 (ТПУ)  
Научный руководитель С.М. СЕМЁНОВ, ст. преподаватель (ТПУ)  
г. Томск

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Термин «космические аппараты» (КА) объединяет искусственные спутники Земли и других планет, орбитальные и межпланетные станции, космические корабли. В их состав входят различные структуры управления, в том числе система ориентации и стабилизации аппаратов (рис. 1) [1].

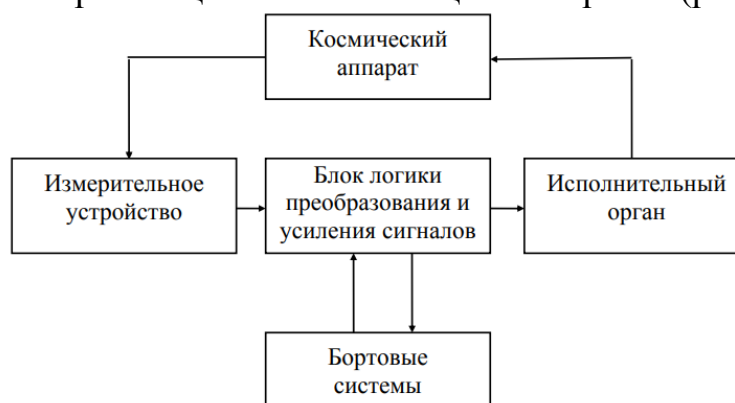


Рис. 1. Функциональная схема системы ориентации и стабилизации КА

В данной структуре двигатель-маховик (ДМ) является электромеханическим исполнительным органом, а управление КА с помощью него сводится к компенсации возмущающих воздействий и созданию моментов для программных поворотов. Момент сопротивления  $M_c$  относится к таким воздействиям и представляет собой суммарный момент от трений в подшипниках ротора и маховика о воздух и магнитных потерь в электродвигателе. Они имеют регулярный характер и зависят от конструкции подшипников, типа опоры, качества сборки и т.п [2].

Поэтому при разработке системы управления динамическим (управляющим) моментом  $M_d$  возникает техническая задача выбора такой структуры, обеспечивающей пропорциональность входного воздействия и выходной величины в требуемом диапазоне частот вращения.

ДМ генерируют управляющие моменты путем варьирования количества движения:

$$M_d(t) = \frac{dH(t)}{dt} = J \frac{d\omega(t)}{dt},$$

где  $J$  – момент инерции системы;  $\omega(t)$ ,  $H(t)$ ,  $M_d(t)$  – соответственно мгновенные значения угловой скорости, кинетического и динамического момента.

Из выше приведенного уравнения следует, что динамический момент пропорционален ускорению вращения ротора  $\frac{d\omega(t)}{dt}$ , т.к. величина момента инерции  $J$  остается постоянной. Поэтому в системе управления требуется наличие отрицательной обратной связи по ускорению ротора (для получения астатичности второго порядка) для компенсации  $M_c$ .

Для решения данной задачи возможен способ управления динамическим моментом на основе применения электропривода с фазовой синхронизацией с компенсацией отклонений от эталонной траектории движения вала, структура которого представлена на рис. 2. В ее состав входят: регуляторы динамического момента (РДМ) и тока (РТ), перемножитель сигналов (ПС), двигатель (СДПМ) и датчик положения ротора (ДПР) [3].

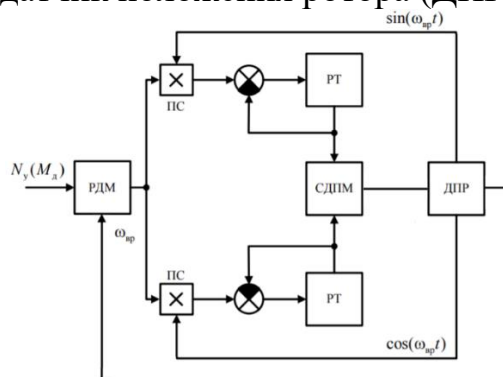


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

В этом варианте используется двухфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами (с синусоидальной формой ЭДС) с векторным полеориентированным управлением ДПР. Но для этого требуются мощные вычислители. Для их исключения из схемы реализуется аналоговая система регулирования (частотно-токовая). При этом в обмотки статора задаются токи, мгновенные значения которых определяются входным сигналом и угловым положением ротора. Здесь, в качестве ДПР используется синусно-косинусный вращающийся трансформатор.

С помощью частотно-токовой системы управления (в составе: ПС, РТ, СДПМ, ДПР) реализуется косвенный метод, не учитывающий влияние  $M_c$ . Для его компенсации вводится обратная связь по углу, которая обрабатывается РДМ, а выходной сигнал данного узла является заданием для РТ. В блок ПС входят импульсы с РТ и гармонические воздействия с ДПР. Полученные сигналы сравниваются с действующим значением фазного тока, а их рассогласование обрабатывается с помощью ШИМ.

В состав РДМ входят: эталонная цифровая модель (ЭЦМ) движения ротора-маховика с ускорением, импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД), корректирующее устройство (КУ), генератор опорной частоты (ГОЧ) и два преобразователя частот (ПЧ1, ПЧ2), электропривод (ЭП). Структура РДМ приведена на рис. 3.

Здесь, в качестве входного воздействия выступает сигнал задающей частоты  $\omega_3$  с ЭЦМ, позволяющий получить требуемые характеристики по крутизне, при этом любое отклонение будет компенсироваться.

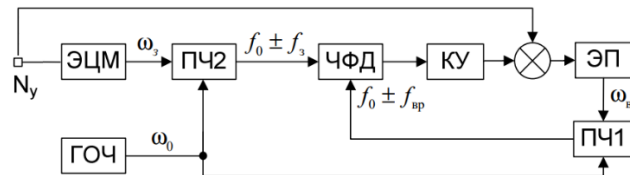


Рис. 3. Структура регулятора динамического момента

Задачей ПЧ1 является сложение гармонической частоты  $\omega_{вр}$ , пропорциональной скорости вращения двигателя, с опорной частотой  $\omega_0$ , вырабатываемой ГОЧ, и выделение из суммы  $(\omega_{вр} + \omega_0)$  импульсов с частотой  $f_{вр} \pm f_0$ . Эти сигналы подаются на один вход ИЧФД, а на другой поступают импульсы, полученные аналогичным образом в ПЧ2, за счет воздействия  $\omega_3$ .

В качестве эталонной модели используется структура с двумя интеграторами, описывающая только механические процессы в двигателе и повышающая порядок астатизма.

ИЧФД выступает как логическое устройство сравнения. Он реализуется в цифровом виде, образующем выходные сигналы при сравнении импульсных частотных последовательностей. Алгоритм работы основан на изменении режима функционирования при приходе двух импульсов одной из частот между соседними сигналами другой частоты [4].

При этом ИЧФД обеспечивает три режима работы:

- разгон с максимальным ускорением (при  $f_{оп} > f_0$ );
- пропорциональный (выходной сигнал пропорционален фазовому рассогласованию сравниваемых частот, при  $f_{оп} \approx f_0$ );
- торможение с максимальным ускорением (при  $f_{оп} < f_0$ ).

Математическая модель, описывающая силовую цепь из СДПМ и двух мостовых инверторов, в нормальной форме Коши относительно переменных состояния:

$$\begin{cases} \frac{di_1(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_1(t) - \frac{1}{L}e_1(t) + \frac{E_0KF_1}{L}; \\ \frac{di_2(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_2(t) - \frac{1}{L}e_2(t) + \frac{E_0KF_2}{L}; \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\Phi_\delta \sin(\theta)}{J}i_1(t) + \frac{\Phi_\delta \cos(\theta)}{J}i_2(t) - \frac{M_c}{J}, \end{cases}$$

где  $\Phi_\delta$  – поток постоянного магнита;  $R, L$  – соответственно активное и индуктивное сопротивления фазы;  $M_c$  – момент сопротивления;  $J$  – момент инерции;  $i_1(t), i_2(t)$  – соответственно мгновенные значения тока первой и второй фазы;  $\omega(t)$  – мгновенная величина угловой скорости вращения;  $\theta$  – угол положения ротора;  $KF_1, KF_2$  – коммутационные функции инверторов соответствующих фаз;  $E_0$  – напряжение питания инверторов.

Мгновенные значения ЭДС обмоток двигателя:

$$e_1(t) = \Phi_\delta \omega(t) \sin(\theta); e_2(t) = \Phi_\delta \omega(t) \cos(\theta).$$

На основе выше приведенной математической модели и схемы силовой цепи [3] в Matlab Simulink построена имитационная модель структуры управления динамическим моментом ДМ с обратной связью по углу, с учетом традиционных допущений обобщенной электромеханической системы, и представлена в виде четырех подсистем (рис. 4)

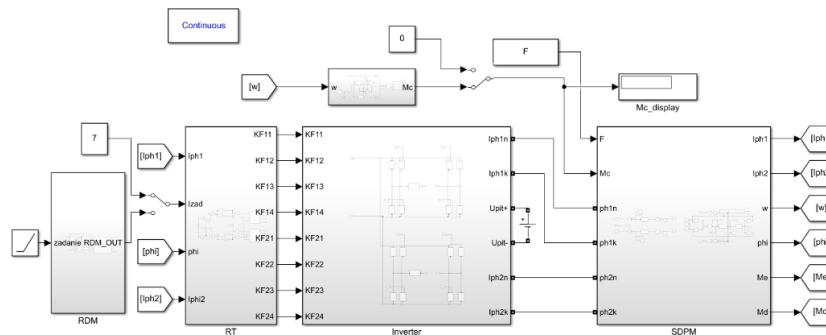


Рис. 4. Имитационная модель системы управления динамическим моментом ДМ с обратной связью по углу

При этом РДМ (подсистема RDM) реализована с помощью программного кода в S-function Builder, а  $M_c$  имеет упрощенное выражение:

$$M_c(t) = M_{тр} + \text{sign}(\omega)k_{вент} \omega^2,$$

где  $M_{тр}$  – момент трогания;  $k_{вент}$  – коэффициент вентиляторной нагрузки.

Получены характеристики динамического момента и скорости вращения при задании ускорения равного  $28 \text{ рад/с}^2$  (рис. 6, 7).

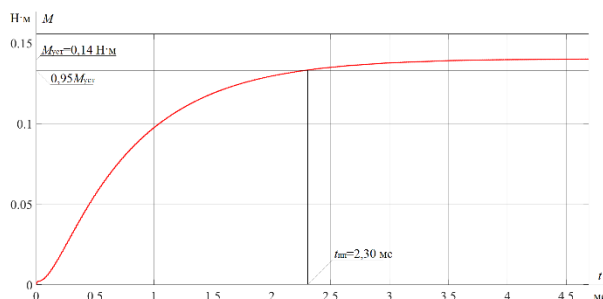


Рис. 6. Переходный процесс  $M_d(t)$

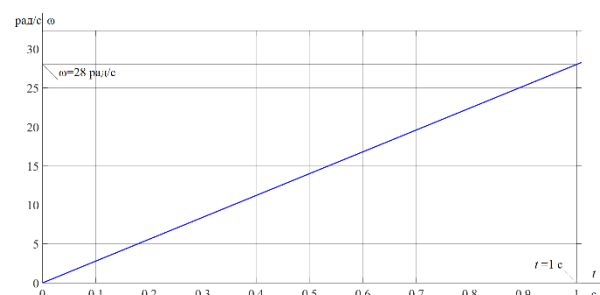


Рис. 7. Характеристика  $\omega(t)$

Из графика  $M_d(t)$  видно, что установившееся значение динамического момента равно  $M_{уст} = 0,14 \text{ Н·м}$  за время переходного процесса  $t_{пт} = 2,3 \text{ мс}$ . На

основе зависимости  $\omega(t)$  рассчитывается ускорение  $\Delta\omega / \Delta t = 28/1 = 28$  рад/с<sup>2</sup>, равное заданному.

На рис. 7, 8 представлены диаграммы динамического и электромагнитного моментов, токов фаз во временном интервале 9 с.

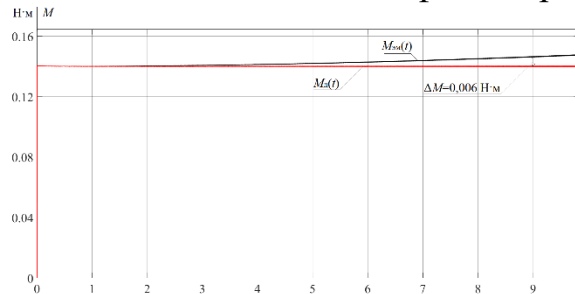


Рис. 7. Характеристики  $M_d(t)$ ,  $M_{эм}(t)$

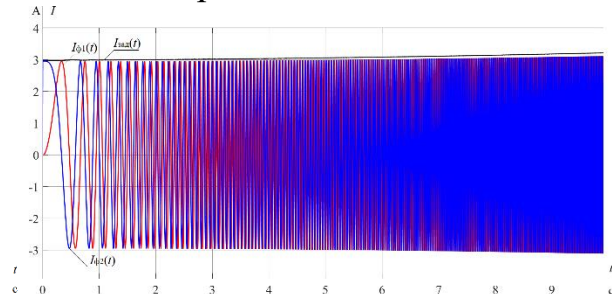


Рис. 8. Характеристики  $I_1(t)$ ,  $I_2(t)$

При этом (рис. 7) наблюдается рост электромагнитного момента на величину 0,006 Н·м при  $M_d = \text{const}$ , что говорит об эффективности компенсации момента сопротивления. Увеличение  $M_{эм}$  происходит за счет РТ, который увеличивает задание на амплитуду тока (рис. 8).

#### Список литературы:

1. Васильев, В.Н. Системы ориентации космических аппаратов / В.Н. Васильев. – Москва: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
2. Гладышев, Г.Н. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов. Часть I / Г.Н. Гладышев, В.С. Дмитриев, Т.Г. Костюченко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 208 с.
3. Балковой, Н.Н. Разработка и исследование системы управления динамическим моментом двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата : дис. ... канд. техн. наук / Балковой Николай Николаевич ; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2018. – 228 с.
4. Четверик, А.Н. Синхронно-фазный электропривод сканирующей системы с квазиоптимальным по быстродействию регулированием : дис. ... канд. техн. наук / Четверик Алина Наилевна ; Омский государственный технический университет. – Омск, 2018. – 238 с.

Информация об авторах:

Попов Семен Семенович, студент гр. 5АМ16, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, [ssp14@tpu.ru](mailto:ssp14@tpu.ru)

Семёнов Сергей Михайлович, ст. преподаватель, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, [ssm@tpu.ru](mailto:ssm@tpu.ru)