

УДК 621.452.3

Е.В. ПАВЛЮК¹, С.В. ЕПИФАНОВ², С.И. СУХОВЕЙ², С.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ³¹ ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина³ ОАО НТК «Электронприлад», Украина

АДАПТИВНАЯ САУ РАСХОДОМ ТОПЛИВА С ПРИВОДОМ ДОЗАТОРА ОТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрена задача синтеза САУ расходом топлива малоразмерного ГТД с дозатором прямого действия с большой зоной нечувствительности. Получен адаптивный алгоритм управления с переключением структуры по разомкнутому циклу, обеспечивающий взаимозаменяемость насосов-дозаторов. Приведены результаты стендовых и моторных испытаний.

газотурбинный двигатель, насос-дозатор, электромеханический преобразователь, сухое трение, зона нечувствительности, адаптация, алгоритм управления

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами

Использование в САУ малоразмерных ГТД дозирующих элементов с непосредственным приводом от электромеханического преобразователя (ЭМП) требует решения ряда сложных проблем, и в первую очередь – обеспечения точности и устойчивости управления в условиях большой нечувствительности, вызванной сухим трением в дозирующем элементе. Несмотря на наличие ряда известных работ в этом направлении, универсальные методы синтеза систем с большой зоной нечувствительности в настоящее время отсутствуют.

В рассматриваемом случае составляющая крутящего момента ЭМП, обусловленная сухим трением, составляет до 20% его максимального значения. При таком большом трении точность регулирования снижается даже при широтно-импульсно модулированном (ШИМ) управлении [1]. В связи с этим в работе [2] предложен алгоритм управления с дополнительным контуром регулирования размаха осциллирующей дозирующего элемента за счет аддитивной осциллирующей составляющей основного сигнала управления. Показана возможность обеспечения высокого качества управления в диапазоне значений

модуля сухого трения от 0 до 40% максимального крутящего момента ЭМП. Однако на практике такой способ адаптации управления к изменению величины трения оказывается чувствительным к уровню шумов в канале измерения положения дозирующего элемента. Источниками шумов являются прежде всего вибрация дозирующего элемента с датчиком положения при работе двигателя на частотах, близких к частоте формирования сигнала управления. В связи с этим выделение высокочастотной осциллирующей составляющей в сигнале обратной связи оказывается затруднительным.

В работе [2] также показана возможность построения системы распознавания модуля сухого трения и адаптации к нему структуры и параметров закона управления. Вместе с тем указанное направление в деталях не рассмотрено, а алгоритм распознавания основан на использовании все той же аддитивной высокочастотной составляющей.

Целью данных исследований является анализ возможности построения адаптивного алгоритма управления дозирующим элементом, обеспечивающего достаточное качество управления в широком диапазоне изменения модуля сухого трения за счет изменения параметров закона управления.

Результаты исследований

Разработка адаптивного алгоритма управления проводилась на основе анализа динамических характеристик дозатора во временной области методом математического моделирования. Математическая модель ЭМП может быть представлена системой уравнений:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + k_v \frac{d\alpha}{dt} + M_{mp} \operatorname{sign} \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) = k_i \cdot i; \tag{1}$$

$$L \frac{di}{dt} + k_w \frac{d\alpha}{dt} + Ri = u,$$

где α – угол поворота ротора;

u, i – напряжение и ток управления;

J – момент инерции ротора;

k_v, k_i, k_w – коэффициенты вязкого трения, крутящего момента и противо-ЭДС;

M_{mp} – модуль момента сухого трения;

L, R – индуктивность и сопротивление обмотки управления.

Замыкающее уравнение системы – пропорционально-дифференциальный закон управления

$$i_0 = k_n (\alpha_0 - \alpha_u) - k_d \frac{\Delta \alpha_u}{T} + k_{II} I_K, \tag{2}$$

где i_0 – расчетный ток управления; α_0, α_u – заданное и измеренное (с учетом запаздывания на период квантования и шумов в канале измерения) значения угла; $\Delta \alpha_u$ – приращение угла за последний период квантования по времени; T – величина периода квантования по времени; k_{II}, k_d, k_{II} – коэффициенты при пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих закона управления; I_K – интегральная составляющая; k – номер текущего периода квантования по времени.

Интегральная составляющая введена в закон управления для компенсации сухого трения и включается в работу только при малых скоростях дозирующего элемента:

$$I_K = \begin{cases} I_{K-1} + (\alpha_0 - \alpha_u)T, & \operatorname{abs}(\Delta \alpha_u) \leq V_0, \\ 0, & \operatorname{abs}(\Delta \alpha_u) > V_0, \end{cases} \tag{3}$$

где V_0 – пороговое значение скорости дозирующего элемента при включении интегральной составляющей.

Переход от расчетного тока управления к длительности импульса при ШИМ-сигнале управления выглядит следующим образом:

$$\tau_0 = i_0 / i_{\max} T, \tag{4}$$

где τ_0 – расчетная длительность импульса;

i_{\max} – максимальный ток управления;

T – период импульсов (принимается равным периоду квантования по времени).

Напряжение на обмотке управления:

$$U = \begin{cases} U_0 \operatorname{sign}(i_0), & \tau \leq \tau_0; \\ 0, & \tau > \tau_0, \end{cases} \tag{5}$$

где U_0 – величина опорного напряжения ШИМ-сигнала управления;

τ – время от начала текущего периода ШИМ-сигнала.

На рис. 1 приведены переходные процессы, вызванные ступенчатым задающим воздействием при двух величинах модуля сухого трения и двух наборах параметров (коэффициентов) закона управления, значения которых приведены в таблице. Как следует из рисунков, каждому значению модуля сухого трения соответствуют свои оптимальные значения коэффициентов закона управления.

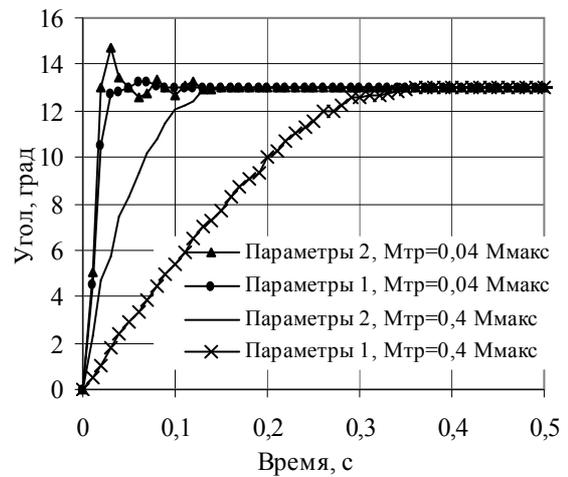


Рис. 1. Переходные процессы при ступенчатом входном воздействии для двух значений модуля сухого трения и двух наборов параметров закона управления

Таблица
Коэффициенты закона управления для двух классов значений модуля сухого трения

| Набор параметров закона управления | k_{II} | k_D | k_{II} |
|------------------------------------|----------|-------|----------|
| 1 ($M_{тр} \leq 0,05 M_{макс}$) | 1,5 | 0,035 | 2,0 |
| 2 ($M_{тр} > 0,05 M_{макс}$) | 2,0 | 0,045 | 2,5 |

Индивидуальная подстройка параметров закона управления под величину модуля сухого трения является технически трудно осуществимой и приводит к нарушению требования взаимозаменяемости насосов-дозаторов. Таким образом, при невозможности получения качества переходных процессов в рамках одного набора параметров закона управления или одной структуры возникает задача их автоматического изменения в зависимости от величины сухого трения.

Проведенное с использованием математической модели (1) исследование в диапазоне значений модуля сухого трения от 0 до 40% максимального крутящего момента ЭМП показывает, что приемлемое качество переходных процессов может быть получено при делении всех возможных значений сухого трения на два класса и реализации двух вариантов значений параметров закона управления (т.н. адаптация по разомкнутому циклу). При этом граница между классами соответствует $M_{тр} = 0,1 M_{макс}$.

Вычислительная процедура оценивания сухого трения с использованием математической модели (1 – 2) является достаточно громоздкой для ее реализации в реальном масштабе времени при малой величине периода квантования. Вместе с тем применение дозирующего элемента с непосредственным приводом от электромеханического преобразователя позволяет реализовать процедуру прямого измерения величины сухого трения на остановленном двигателе одновременно с проведением тестирования работоспособности и целостности электрических цепей насоса-дозатора. При этом в связи с высоким быстродействием ЭМП длительность та-

кой процедуры практически не сказывается на продолжительности подготовки к запуску. Сам же алгоритм заключается в определении величины тока управления i_0 в момент выхода дозирующего элемента на упор при плавном увеличении тока от 0 и начале движения дозирующего элемента с противоположного упора. Связь величины модуля сухого трения с полученным значением тока управления описывается моделью (1). Такое прямое измерение устраняет необходимость введения каких либо дополнительных мер по исключению автоколебательных режимов при работе на границе двух выделенных классов значений модуля сухого трения.

На рис. 2 приведены переходные процессы при ступенчатом задающем воздействии в замкнутой САУ положением дозирующего элемента в составе имитатора насоса-дозатора и технологического блока управления и контроля (БУК) с реализованным алгоритмом адаптивного управления.

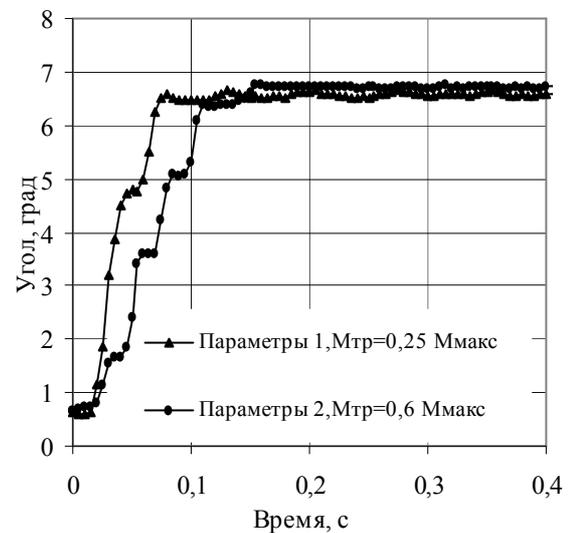


Рис. 2. Переходные процессы при ступенчатом входном воздействии на имитаторе насоса-дозатора с технологическим БУК с адаптивным алгоритмом управления

Имитатор насоса-дозатора позволял физически регулировать величину модуля сухого трения, и на рис. 2 указаны значения измеренной величины модуля сухого трения и использованного набора зна-

чений параметров закона управления. Как следует из рис. 2, БУК обеспечивает надежное измерение величины модуля сухого трения, а за счет переключения значений параметров закона управления в зависимости от его величины позволяет получить приемлемое качество переходных процессов.

На рис. 3 и 4 приведены процессы запуска двигателя АИ-450-МС с двумя насосами-дозаторами с различным уровнем модуля сухого трения и одним и тем же блоком управления и контроля БУК-МС2 с адаптивным алгоритмом управления в контуре управления расходом топлива. Рисунки подтверждают работоспособность предложенного адаптивного алгоритма управления, а также достигнутую взаимозаменяемость насосов-дозаторов и БУК.

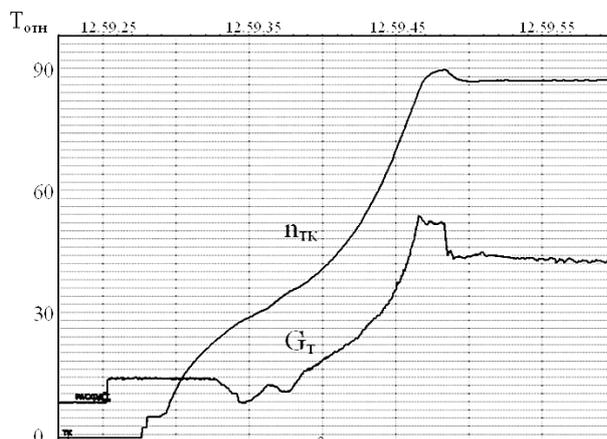


Рис. 3. Процесс запуска двигателя АИ-450-МС (n_{TK} , G_T) с насосом-дозатором с низким уровнем сухого трения

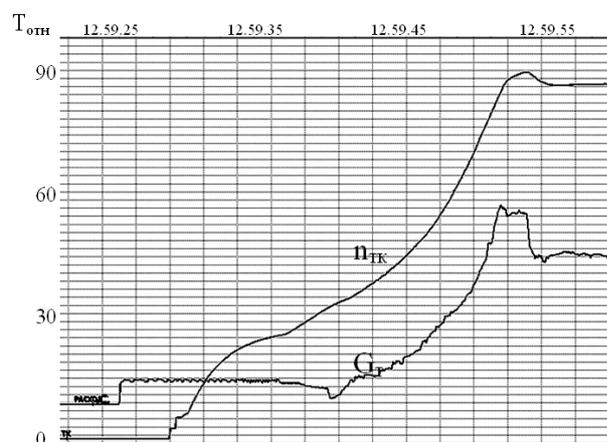


Рис. 4. Процесс запуска двигателя АИ-450-МС (n_{TK} , G_T) с насосом-дозатором с высоким уровнем сухого трения

Направления дальнейших исследований

Полученный способ адаптивного управления, реализованный в САУ расходом топлива ГТД, является частным решением сформулированной выше проблемы, поскольку предполагает постоянство сухого трения в течение по крайней мере одного запуска двигателя и во всех положениях дозирующего элемента. Для полного решения необходима процедура непрерывного наблюдения величины сухого трения. По мере развития вычислительных возможностей бортовых средств управления и контроля такая задача становится все более актуальной и разрешимой.

Выводы

Получен способ адаптивного управления положением дозирующего элемента, позволяющий обеспечить достаточное качество процессов управления в широком диапазоне изменения модуля сухого трения.

Литература

1. Цифровое регулирование расхода топлива в системе с существенной нелинейностью типа “сухое трение” / В.И. Колесников, В.А. Седристый, Г.С. Ранченко, Н.Л. Голубев, Д.И. Волков, Е.В. Павлюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 30. – С. 191-194.
2. Павлюк Е.В. Адаптивное управление положением дозирующего элемента насоса-дозатора с приводом от электромеханического преобразователя в условиях изменения модуля сухого трения // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 31. – С. 90-93.

Поступила в редакцию 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков.