

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ ДОЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НАСОСА-ДОЗАТОРА С ПРИВОДОМ ОТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ СУХОГО ТРЕНИЯ

*Е.В. Павлюк, канд. техн. наук, Харьковское агрегатное конструкторское бюро, г. Харьков, Украина*

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Использование в насосах-дозаторах дозирующих элементов на основе плоского золотника с непосредственным приводом от электро-механического преобразователя (ЭМП) является перспективным направлением развития топливрегулирующей аппаратуры ГТД. Плоские золотники обладают повышенной грязестойкостью, а прямой привод от ЭМП позволяет исключить использование традиционных преобразователей типа сопло-заслонка, включающих в свой состав набор дроссельных пакетов и предъявляющих высокие требования к чистоте топлива. Вместе с тем управление такими элементами требует решения ряда сложных проблем, и в первую очередь – управление положением в условиях большой нечувствительности, вызванной сухим трением в золотнике, а также нестационарный характер трения.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Для повышения чувствительности исполнительных элементов в условиях действия сухого трения применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) сигнала управления [1]. В рассматриваемом случае модуль сухого трения составляет до 20% максимального крутящего момента ЭМП, что вызвано необходимостью замораживания текущего положения дозирующего элемента при отказе электронной системы управления. При таком большом трении точность регулирования снижается даже при ШИМ управлении [2], что связано с конечным временем нарастания тока в обмотке управления. Для повышения точности регулирования необходима вибрационная линеаризация сухого трения, введение которой возможно путем организации высокочастотных автоколебаний за счет настройки закона управления или аддитивной осциллирующей составляющей как аппаратной, так и про-

граммной. Однако в условиях возможного изменения сухого трения в широких пределах при изменении уровня вибраций двигателя и износе золотника не удастся выбрать единый уровень осциллирующей составляющей, обеспечивающий ее стабильность при приемлемом размахе осцилляций. Тем самым выдвигается задача разработки адаптивного алгоритма управления, обеспечивающего непрерывное оценивание сухого трения и подстройку структуры и параметров закона управления при изменении трения.

Цель исследований. Целью исследований являлся анализ возможности построения адаптивного алгоритма управления дозирующим элементом, обеспечивающего достаточное качество управления в широком диапазоне изменения модуля сухого трения.

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:

$$\begin{aligned} J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + k_v \frac{d\alpha}{dt} + M_{тр} \operatorname{sign} \left( \frac{d\alpha}{dt} \right) &= K_i \cdot i, \\ L \frac{di}{dt} + k_w \frac{d\alpha}{dt} + R i &= u, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – 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,

$M_{тр}$  – модуль момента сухого трения,

$L, R$  – индуктивность и сопротивление обмотки управления.

Уравнение замыкания системы – пропорционально-дифференциальный закон управления с аддитивной осциллирующей составляющей:

$$i_0 = k_{\Pi} (\alpha_0 - \alpha_{и}) - k_{д} \frac{\Delta\alpha_{и}}{T} + (-1)^k i_{А}, \quad (2)$$

где  $i_0$  – расчетный ток управления,

$\alpha_0, \alpha_{и}$  – заданное и измеренное (с учетом запаздывания на период квантования и шумов в канале измерения) значения угла,

$\Delta\alpha_{и}$  – приращение угла за последний период квантования по времени,

$T$  – величина периода квантования по времени,

$k_{\Pi}, k_{д}$  – коэффициенты при пропорциональной и дифференциальной составляющих закона управления,

$k$  – номер текущего периода квантования по времени,

$i_{А}$  – ток осциллирующей составляющей.

При таком (программном) способе формирования аддитивной осциллирующей составляющей ее частота равна половине тактовой частоты регулирования.

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

$$\tau_0 = i_0 / i_{\max} T, \quad (3)$$

где  $\tau_0$  – расчетная длительность импульса,

$i_{\max}$  – максимальный ток управления,

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

Напряжение на обмотке управления:

$$U = \begin{cases} U_0 \operatorname{sign}(i_0), & \tau \leq \tau_0, \\ 0, & \tau > \tau_0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $U_0$  – величина опорного напряжения ШИМ-сигнала управления,

$\tau$  – время от начала текущего периода ШИМ-сигнала.

На рис. 1 приведены переходные процессы отработки ступенчатого задающего воздействия при разных величинах модуля сухого трения и тока аддитивной осциллирующей составляющей. Параметры закона управления (3) во всех случаях были одинаковыми. Как следует из рисунка, каждому значению сухого трения соответствует свое оптимальное значение тока осцилляции. При этом за счет его подстройки под величину сухого трения можно обеспечить приемле-

мое качество переходных процессов в широком диапазоне изменения модуля сухого трения.

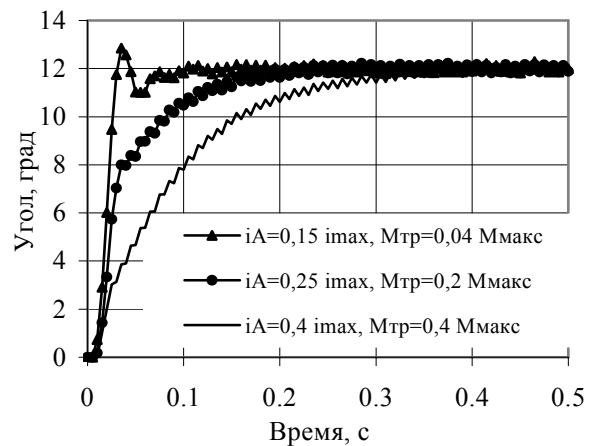


Рис. 1. Переходные процессы по отработке ступенчатого входного воздействия

Алгоритм оценивания сухого трения может быть основан на его идентификации по математической модели (1) – (2). Однако вычислительная процедура такого оценивания является достаточно громоздкой для ее реализации в реальном масштабе времени при малой величине периода квантования. Более эффективным является выделение косвенных признаков, численные значения которых связаны с величиной сухого трения. Одним из таких возможных признаков является размах осцилляции дозирующего элемента на частоте аддитивной осциллирующей составляющей, для выделения которого можно воспользоваться простым алгоритмом:

$$A_i = (T|\alpha_k - \alpha_{k-1}| + T_f A_{i-1}) / (T + T_f), \quad (5)$$

где  $A_k, A_{k-1}$  – осредненный размах осцилляции на текущем и предыдущем шагах,

$T_f$  – постоянная времени фильтра.

Для обеспечения инвариантности выделенного признака к изменению задающей амплитуды осцилляции целесообразно использовать его нормированное значение:

$$A'_i = A_i / i_{А}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведена зависимость значений признака (6) от модуля сухого трения при различных уровнях шума в измерительном канале угла положения и различном характере входного воздействия (постоян-

ном и периодическом). Величина задающей амплитуды осцилляции подбиралась такой, чтобы обеспечить примерно одинаковое значение размаха осцилляции дозирующего элемента. Как следует из рисунка, меньшим значениям модуля сухого трения соответствуют большие значения признака (6). Расслоение зависимости признака (6) от модуля сухого трения при различных уровнях шумов и входных воздействиях при примерно одном и том же размахе осцилляции сравнительно невелико, что говорит о возможности построения на его основе системы распознавания модуля сухого трения и адаптации к нему структуры и параметров закона управления.

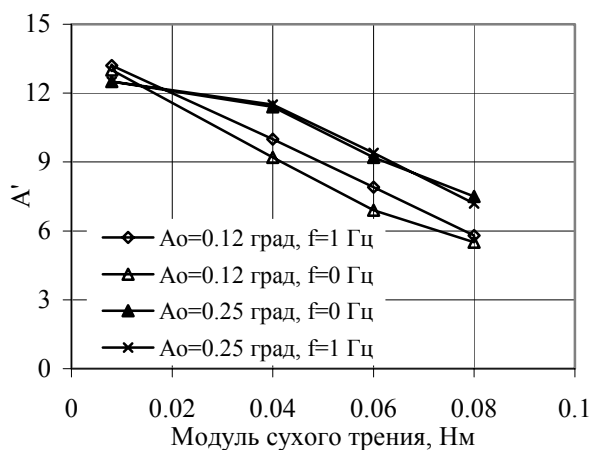


Рис. 2. Связь значений признака сухого трения с модулем сухого трения при различных средних размахах осцилляций  $A_0$  и различной частоте входного воздействия  $f$

Вместе с тем рис. 1 показывает, что адаптация закона управления к модулю сухого трения может быть построена непосредственно на основе регулирования размаха осцилляции дозирующего элемента, поскольку приемлемому качеству переходных процессов соответствует примерно постоянный размах осцилляций. Действительно, в связи с тем, что полоса пропускания основного контура управления существенно ниже тактовой частоты, возможна организация дополнительного контура в том же канале управления путем введения в закон управления (2) регулируемой аддитивной осциллирующей составляющей тока:

$$i_A = k_1 (A_0 - A_k) + k_2 \Sigma (A_0 - A_k) T, \quad (7)$$

где  $A_0$  – заданный размах осцилляции,

$k_1, k_2$  – коэффициенты при пропорциональной и

интегральной составляющих ПИ-регулятора размаха осцилляции.

Задача определения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  сводится к задаче синтеза цифровой САУ на всем множестве изменений параметров сухого трения. В данном случае эта задача решалась также на основе анализа динамических характеристик во временной области. На рис. 3 и 4 приведены переходные процессы в адаптивной САУ положением дозирующего элемента с регулируемым размахом осциллирующей составляющей. При этом моделировалось скачкообразное изменение модуля сухого трения в десятикратном диапазоне от  $0,04 M_{\text{макс}}$  до  $0,4 M_{\text{макс}}$ . Как следует из рисунков, даже при величине модуля сухого трения 40% от максимального крутящего момента ЭМП динамические характеристики контура управления положением дозирующего элемента вполне удовлетворяют требованиям верхних контуров управления ГТД. При амплитуде входного воздействия 25% хода дозирующего элемента на частоте 1 Гц сдвиг по фазе не превышает  $10^\circ$ .

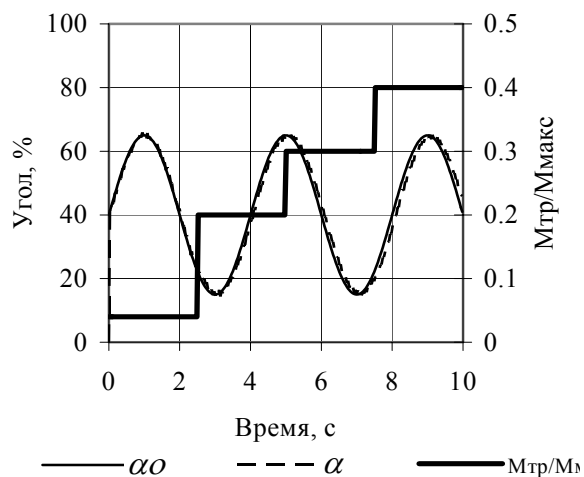


Рис. 3. Отработка входного воздействия частотой 0,25 Гц в условиях изменения модуля сухого трения

На рис. 5 показано изменение аддитивной токовой составляющей в процессе регулирования размаха осцилляций при отработке входного воздействия частотой 0,5 Гц и амплитудой 25% при скачкообразном изменении модуля сухого трения. Как следует из рисунка, переходные процессы регулирования размаха осцилляций являются устойчивыми при длительности

не более 0,3 с. При увеличении модуля сухого трения в 10 раз величина аддитивной токовой составляющей увеличивается примерно в 1,7 раза для сохранения заданного размаха осцилляций.

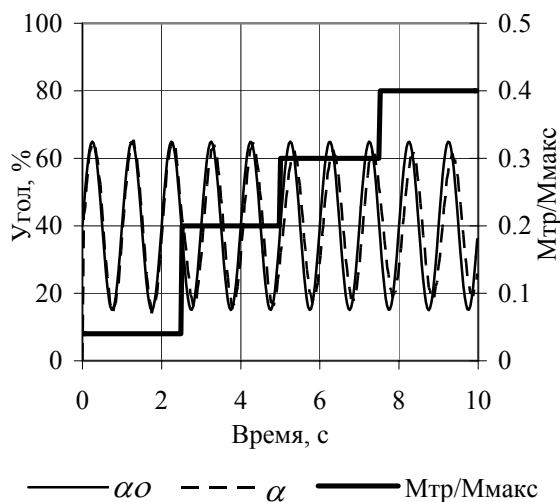


Рис. 4. Обработка входного воздействия частотой 1 Гц в условиях изменения модуля сухого трения

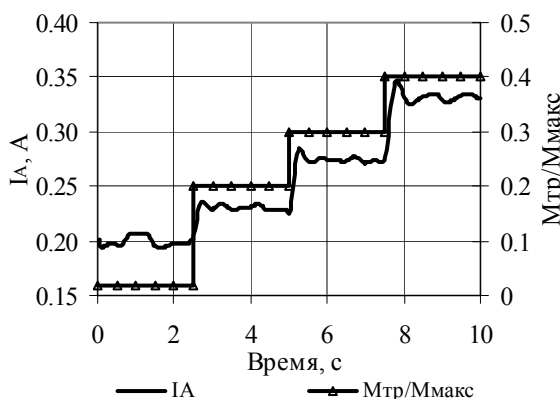


Рис. 5. Переходные процессы в контуре регулирования размаха осцилляций при изменении модуля сухого трения

**Направления дальнейших исследований.** Наряду с полученным решением по организации адаптивного управления положением дозирующего элемента за счет регулирования размаха осцилляций целесообразно также рассмотреть возможность построения адаптивной релейной автоколебательной системы с поддержанием постоянной амплитуды автоколебаний [3]. При этом для выделения размаха автоколебаний также может быть использован алгоритм (5).

Возможным ограничением принятого направления адаптации управления к изменению сухого трения за

счет поддержания заданного размаха осцилляций дозирующего элемента является дополнительное знакопеременное нагружение топливной системы за счет высокочастотной пульсации давления топлива. Хотя амплитуда пульсации давления и невелика, следует также рассмотреть возможность построения адаптивной системы с переменной структурой, обеспечивающей такое же непрерывное перемещение дозирующего элемента вблизи заданного положения, но с существенно меньшей частотой.

**Выводы.** Получен способ адаптивного управления положением дозирующего элемента, позволяющий обеспечить достаточное качество процессов управления в широком диапазоне изменения модуля сухого трения за счет введения в основной канал управления дополнительного контура регулирования размаха осцилляций. В качестве дополнительного регулирующего фактора использована величина аддитивной осциллирующей токовой составляющей в основном законе управления.

### Литература

1. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления.– М.: Наука.– 1979.– 255 с.
2. 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: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2002.– Вып. 30 Двигатели и энергоустановки.– С. 191-194.
3. Теория автоматического управления. Ч.П. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова.– М.: Высш. шк., 1986. – 504 с.

Поступила в редакцию 10.07.03

**Рецензенты:** канд. техн. наук, нач. расчетно-перспективного отдела Н.В. Горбатюк, ГП ХКБД, г. Харьков; д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», г. Харьков.