

УДК 629.7.03

И.Е. КИТАЙЧУК<sup>1</sup>, В.С. МИХЕЕВ<sup>1</sup>, Е.А. МОДИЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.Н. ШИЙКА<sup>2</sup><sup>1</sup>НТ СКБ «ПОЛИСВИТ» филиал ГНПП «Объединение Коммунар», Харьков, Украина<sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПД-ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ДОЗАТОРОМ ТОПЛИВА ИЗ СОСТАВА САУ ГТД

Описана методика приближенного аналитического определения коэффициентов дискретного ПД-закона управления дозатором топлива из состава САУ ГТД. Рассмотренная методика основана на составлении разностного кинематического уравнения поведения модели указанного дозатора, упрощенно представленной в виде последовательного соединения звена с запаздыванием, пропорционального звена и интегрирующего звена. Приведены результаты уточнения значений коэффициентов закона управления, полученные при математическом и натурном моделировании.

**ПД-закон, ПД-регулятор, дискретная автоматическая система, дозатор топлива, дозирующая игла, модель дозатора топлива, разностное уравнение, коэффициенты закона управления**

### Введение

В настоящее время все большее распространение получают дискретные системы управления с использованием в регуляторах малогабаритных цифровых контроллеров [1]. С помощью таких контроллеров легко реализуется получивший широкое распространение пропорционально-дифференциальный закон управления (ПД-закон) [2, 3]. Этот закон, в частности, хорошо подходит для управления объектами, которые могут быть упрощенно представлены в виде последовательного соединения звена с запаздыванием, пропорционального звена и интегрирующего звена. При разработке контура автоматического управления основной проблемой является определение значений коэффициентов выбранного закона управления [3, 4]. Представляется целесообразным решать эту задачу в два этапа. На первом этапе указанные коэффициенты приближенно определяются в результате составления и решения уравнения, описывающего поведение упрощенной аналитической модели объекта управления. На втором этапе полученные приближенные значения уточняются с помощью математического и натурного моделирования. Предварительное аналитическое определение коэффициентов закона управления позволя-

ет сократить время их уточнения в процессе моделирования. В данной статье описана примененная авторами методика аналитического определения приближенных значений коэффициентов ПД-закона управления дозатором топлива из состава системы автоматического управления (САУ) газотурбинного двигателя (ГТД).

### 1. Постановка задачи

Целью управления рассматриваемым дозатором является достижение и удержание заданного положения его дозирующей иглы (ДИ). Изменение и удержание положения ДИ осуществляется с помощью подаваемого на дозатор широтно-импульсного сигнала. При этом управляющим параметром является выраженное в процентах отношение длительности импульса к периоду (скважность) этого сигнала. Связь углового положения ДИ со скважностью управляющего широтно-импульсного сигнала описывается формулой

$$\frac{d\alpha}{dt} = K \cdot (q - q_B), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угловое положение ДИ, град;  $K$  – коэффициент пропорциональности, град/с/%;  $q$  – скважность управляющего сигнала, %;  $q_B$  – равновесное значе-

ние скажности управляющего сигнала, %.

При этом имеется инерционное запаздывание изменения положения ДИ относительно изменения управляющего параметра (скважности)  $q$ .

Поставленная задача состоит в разработке методики приближенного определения коэффициентов ПД-закона управления дозатором.

## 2. Упрощенная модель дозатора

Известно [5, 6], что с учетом инерционного запаздывания дозатор топлива рассматриваемого типа обычно представляется в виде последовательного соединения аperiodического звена 1-го порядка и идеального интегрирующего звена. При этом формула (1) описывает поведение идеального интегрирующего звена. Переходная функция такой модели имеет вид

$$H(t) = K \left[ t - T \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right], \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент передачи аperiodического звена;  $T$  – постоянная времени аperiodического звена.

Для упрощения поставленной задачи представим упрощенную модель дозатора в виде последовательного соединения звена с чистым запаздыванием, пропорционального звена и идеального интегрирующего звена. Переходная функция такой модели имеет вид

$$H(t) = \begin{cases} K(t-T) & \text{при } t \geq T; \\ 0 & \text{при } t < T. \end{cases} \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент передачи пропорционального звена;  $T$  – время запаздывания звена с чистым запаздыванием.

Переходные функции обеих рассмотренных моделей (рис. 1) после завершения переходного процесса ( $t \geq T$ ) асимптотически сходятся. При этом значение коэффициента  $K$  может быть получено из формулы (1). Графическое представление экспериментально полученной переходной функции дозатора позволяет [5] определить значение времени за-

паздывания  $T$ , как показано на рис. 1. При этом время запаздывания  $T$  состоит из задержки реакции ДИ и задержки установления нового значения скажности широтно-импульсного управляющего сигнала.

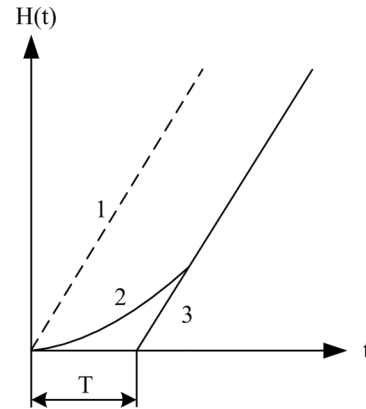


Рис. 1. Переходная функция: 1 – идеальное интегрирующее звено; 2 – последовательное соединение аperiodического звена и идеального интегрирующего звена; 3 – последовательное соединение звена с запаздыванием, пропорционального звена и идеального интегрирующего звена

## 3. Исходные принципы управления

Для управления ДИ применен пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор)  $P$ , реализованный с использованием цифрового микроконтроллера (рис. 2). На регулятор  $P$  поступает заданное значение  $\alpha_R$  положения ДИ. Кроме того, на регулятор  $P$  поступает текущее значение положения ДИ  $\alpha$ .

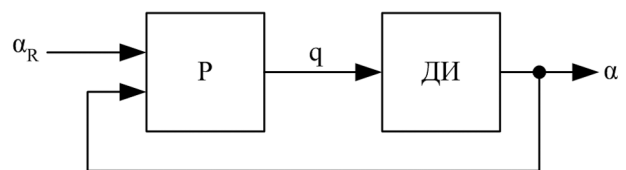


Рис. 2. Упрощенная схема контура управления: 1 – регулятор; 2 – дозирующая игла

Регулятор  $P$  формирует в соответствии с ПД-законом значение управляющего параметра  $q$  на основании вычисленных в дискретные моменты времени значений отклонения положения ДИ от заданного. При этом вычисленное в момент  $K$  отклонение положения ДИ от заданного определяется

формулой

$$\Delta\alpha_K = \alpha_K - \alpha_R, \quad (4)$$

где  $\Delta\alpha_K$  – отклонение положения ДИ от заданного;  $\alpha_K$  – положение ДИ в момент  $K$ ;  $\alpha_R$  – заданное положение ДИ.

При разработке закона управления ДИ приняты следующие исходные положения:

- управление положением ДИ представляет собой итеративный процесс, целью каждого шага которого является уменьшение отклонения текущего положения ДИ от заданного;

- в начале каждого очередном шага итерации измеряется отклонение положения ДИ от заданного. Это измеренное отклонение используется для определения нового управляющего воздействия, которое выдается на дозатор в начале следующего шага итерации;

- на каждом очередном шаге на дозатор выдается измененное управляющее воздействие, определенное с учетом измеренного в начале предыдущего шага итерации отклонения от заданного положения ДИ;

- шаги итерации повторяются периодически. При этом период следования тактов итерации предварительно выбирается равным времени запаздывания  $T$  реакции ДИ от измененного воздействия  $q$  на дозатор.

#### 4. Получение упрощенного уравнения движения ДИ, выраженного в конечных разностях

Как известно [3, 4, 6], уравнение движения объекта управления составляется с учетом его физических особенностей и принятых принципов управления.

С учетом приведенных исходных данных движение ДИ к заданному угловому положению  $\alpha_R$  иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 3.

В каждый момент начала очередного шага итерации происходит изменение скорости движения

ДИ. Новое значение скорости ДИ определяется формулой (1). При этом воздействие нового значения скважности  $q$  отстает от момента ее определения на два такта. Один такт задержки тратится на выполнение требуемых вычислений, а второй – обусловлен задержкой реакции ДИ. Для определения закона управления ДИ составим кинематическое уравнение планируемого движения ДИ на интервале от момента  $K$  (начало текущего такта  $K$ ) до момента  $K + 2$  (конец такта  $K + 1$ ). При этом предполагается, что в момент  $K + 2$  будет достигнуто заданное значение  $\alpha_R$ .

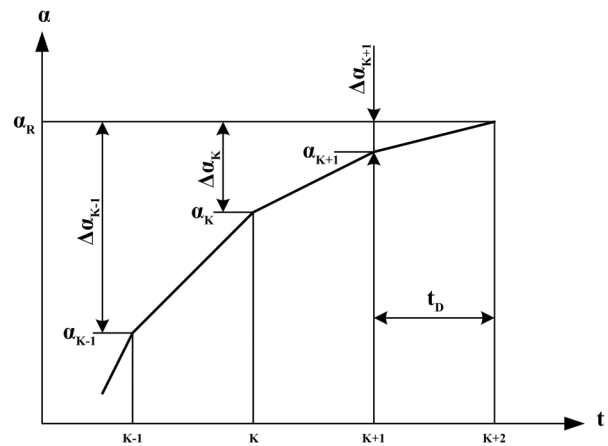


Рис. 3. График движения ДИ

Как следует из рис. 3 и приведенных принципов управления ДИ такое уравнение имеет вид

$$\alpha_R - \alpha_K = (\alpha_{K+1} - \alpha_K) + (\alpha_R - \alpha_{K+1}), \quad (5)$$

где  $\alpha_R$  – заданное положение ДИ;  $\alpha_K$  – положение ДИ в момент  $K$ ;  $\alpha_{K+1}$  – положение ДИ в момент  $K + 1$ .

Выражение, заключенное в первые скобки в правой части уравнения (5), представляет собой прогнозируемое приращение положения ДИ на тактовом интервале  $K$ . Выражение, заключенное во вторые скобки в правой части уравнения (5), представляет собой прогнозируемое приращение положения ДИ на тактовом интервале  $K + 1$ . Сделав приближенное допущение о равенстве приращений положения ДИ на тактовых интервалах  $K - 1$  и  $K$ , и заменив предполагаемое приращение положения ДИ на

тактовом интервале  $K + 1$  его выражением в соответствии с формулой (1), получаем:

$$\alpha_R - \alpha_K = (\alpha_K - \alpha_{K-1}) + (q_K - q_B)KT, \quad (6)$$

где  $\alpha_R$  – заданное положение ДИ;  $\alpha_K$  – положение ДИ в момент  $K$ ;  $\alpha_{K-1}$  – положение ДИ в момент  $K - 1$ ;  $q_K$  – значение скважности управляющего сигнала в момент  $K$ ;  $q_B$  – равновесное значение скважности управляющего сигнала;  $K$  – коэффициент передачи пропорционального звена, определяемый из формулы (1);  $T$  – время запаздывания звена с чистым запаздыванием.

Разрешив уравнение (6) относительно  $q_K$ , получаем:

$$q_K = q_B + \frac{(\alpha_R - \alpha_K) + (\alpha_{K-1} - \alpha_K)}{KT}. \quad (7)$$

Выполнив тривиальные преобразования и заменив в (7) разности положений ДИ соответствующими отклонениями ( $\Delta\alpha$ ) положений ДИ от заданного положения  $\alpha_R$  в соответствии с формулой (4), окончательно получаем:

$$q_K = q_B - \frac{\Delta\alpha_K}{KT} - \frac{\Delta\alpha_K - \Delta\alpha_{K-1}}{KT}, \quad (8)$$

где  $q_K$  – скважность управляющего сигнала, рассчитанная в такте  $K$ ;  $q_B$  – равновесное значение скважности;  $\Delta\alpha_K$  – отклонение положения ДИ в момент  $K$ ;  $K$  – коэффициент передачи пропорционального звена;  $T$  – время запаздывания звена с чистым запаздыванием;  $\Delta\alpha_{K-1}$  – отклонение положения ДИ в момент  $K - 1$ .

Уравнение (8) выражает требуемое в момент  $K$  значение скважности  $q_K$  через параметры модели  $K$  и  $T$ , значения отклонений положения ДИ, измеренные в моменты  $K$  и  $K - 1$ , и значение равновесной скважности  $q_B$ .

## 5. Определение приближенных значений коэффициентов ПД-закона управления дозатора

Полученное уравнение (8) представляет собой искомый закон управления, определяющий текущее значение скважности управляющего сигнала через

значения отклонений ДИ от заданного положения в текущем и предшествующем тактах. Очевидно, что записанное в конечных разностях уравнение (8) описывает пропорционально-дифференциальный закон (ПД-закон) управления. В общем виде ПД-закон выражается в конечных разностях уравнением

$$q_K = q_B + K_P \cdot \Delta\alpha_K + K_D (\Delta\alpha_K - \Delta\alpha_{K-1}), \quad (9)$$

где  $q_K$  – значение управляющей переменной в текущем такте  $K$ ;  $q_B$  – константа;  $K_P$  – пропорциональный коэффициент;  $\Delta\alpha_K$  – отклонение положения ДИ в момент  $K$ ;  $K_D$  – дифференциальный коэффициент;  $\Delta\alpha_{K-1}$  – отклонение положения ДИ в момент  $K - 1$ .

Сравнение уравнений (8) и (9) позволяет определить приближенные значения пропорционального  $K_P$  и дифференциального  $K_D$  коэффициентов ПД-закона управления дозатором:

$$K_P = K_D = -\frac{1}{KT}, \quad (10)$$

где  $K_P$  – пропорциональный коэффициент;  $K_D$  – дифференциальный коэффициент;  $K$  – коэффициент передачи пропорционального звена, определяемый из формулы (1);  $T$  – время запаздывания звена с чистым запаздыванием, определяемое экспериментально.

Для конкретного дозатора экспериментально полученное значение коэффициента  $K$  равно 0,9 град/с/%, а значение времени запаздывания  $T$  равно 0,15 с. При этом в соответствии с формулой (10) численные значения пропорционального  $K_P$  и дифференциального  $K_D$  коэффициентов ПД-закона управления конкретного дозатора равны  $-7,4$ .

## 6. Результаты уточнения коэффициентов ПД-закона управления дозатором

С целью уменьшения амплитуды пульсаций установившегося значения положения ДИ [5] период тактов управления дозатором был уменьшен до 25 мс. Для уточненного определения пропорционального  $K_P$  и дифференциального  $K_D$  коэффициентов ПД-закона (9), обеспечивающих требуемые ха-

рактеристики управления конкретным дозатором, было выполнено математическое и натурное моделирование [7]. При этом установлено, что наилучшие результаты достигаются при  $K_P = -9$  и  $K_D = -4$ . Испытания контура управления конкретного дозатора (рис. 2) в составе ГТД подтвердили указанные результаты. Очевидно, что приближенные и уточненные значения коэффициентов  $K_P$  и  $K_D$  являются числами одного порядка. Полученное расхождение между приближенными и окончательно принятыми значениями коэффициентов  $K_P$  и  $K_D$  является вполне приемлемым [8].

### Выводы

Результаты математического и натурального моделирования, а также испытания в составе ГТД подтвердили возможность использования формулы (10) для аналитического определения приближенных значений коэффициентов ПД-закона управления дозатора топлива рассматриваемого типа.

Приведенная методика приближенного определения коэффициентов ПД-закона управления основана на использовании упрощенной модели объекта управления в виде последовательного соединения звена с чистым запаздыванием, пропорционального звена и идеального интегрирующего звена. Это дает основание полагать, что расчетная формула (10) приемлема для любого объекта управления, который может быть представлен в виде указанной упрощенной модели. Примерами таких объектов управления являются [5] электродвигатели и гидродвигатели, обычно представляемые в виде последовательного соединения апериодического звена 1-го порядка и идеального интегрирующего звена.

Предварительное аналитическое определение приближенных значений коэффициентов ПД-закона

управления с помощью простой формулы (10) позволяет сократить затраты при последующем определении уточненных значений указанных коэффициентов, выполняемом средствами математического и натурального моделирования.

### Литература

1. Залманзон Л.А. Микропроцессоры и управление потоками жидкостей и газов. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. – С.-Пб.: Питер, 2005. – 336 с.
3. Фрер Ф. и Ортгенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования: Пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 192 с.
4. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б. Кузнецов и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
5. Основы автоматического управления / Г.И. Ванюрихин, А.Н. Герасимов, С.В. Лучко и др. – М.: Воениздат, 1972. – 328 с.
6. Танатар А.И. Элементы промышленной автоматики и их динамические свойства. – К.: Техника, 1975. – 232 с.
7. Кулик А.С. Основы моделирования систем. – Х.: ХАИ, 1988. – 95 с.
8. Черкасов Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.

*Поступила в редакцию 19.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.