

УДК 629.7.03:681.513.03

И.Ю. ДЫБСКАЯ, С.Н. ФИРСОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДОЗИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА ВОЗМУЩЕНИЙ

Рассмотрено управление дозирующим элементом газотурбинных двигателей ЛА, используемых для различных типов ЛА, математическая модель которого включает модель сухого трения с параметрами, существенно изменяющимися в процессе эксплуатации. Синтезирован регулятор дозирующего элемента на основе динамического компенсатора возмущений, который позволяет существенно уменьшить влияние неидеальностей реальных исполнительных устройств (ИУ). Задача компенсации влияния неидеальностей ИУ решается на основе функционального уравнения за счет формирования дополнительного сигнала управления, полученного в результате восстановления вектора рассогласования реального исполнительного устройства и номинальной достижимой линейной модели ИУ. Показана разрешимость операторного уравнения как существование дополнительного сигнала управления, компенсирующего влияние неидеальностей ИУ.

дозированный элемент, газотурбинный двигатель, алгоритмы регулирования расхода топлива, зона нечувствительности, динамический компенсатор возмущений, итерационно-инверсный фильтр

Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются для различных типов ЛА. Одним из основных элементов ГТД, динамика которого определяет качество функционирования ГТД, является дозирующий элемент (ДЭ), представляющий собой плоский золотник с электромагнитным управлением.

В процессе функционирования ДЭ подвергается воздействию возмущений. Наиболее характерными возмущениями являются сухое и вязкое трение, неучтенная динамика ДЭ и др. Действие неконтролируемых возмущений приводит к тому, что в характеристиках ДЭ появляются нелинейности, которые ухудшают качество управления ДЭ и ограничивают возможности повышения точности системы автоматического управления ДЭ. Поэтому при исследовании свойств ДЭ математическая модель, представленная в работе [1], должна учитывать имеющиеся нелинейности реальных элементов.

Формулирование проблемы. Рассмотрим в качестве примера интегрирующее звено с зоной не-

чувствительности a , охваченное единичной обратной связью (рис. 1).

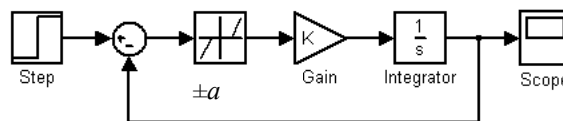


Рис. 1. Блок-схема исследуемого объекта

Подобной математической моделью можно в первом приближении описать ДЭ ГТД со свободной турбиной в области низких частот. Переходные характеристики объекта с коэффициентом $K=5$ и различными зонами нечувствительности представлены на рис. 2. На рис. 2 позиция 1 соответствует процессу в объекте с нулевой зоной нечувствительности; 2 – для объекта с $a=0,1$; 3 – для объекта с $a=0,2$; 4 – для объекта с $a=0,3$; 5 – для объекта с $a=0,4$. Из результатов моделирования следует, что с увеличением величины сухого трения, что соответствует увеличению зоны нечувствительности, в объекте увеличивается статическая ошибка. Для компенсации этой ошибки возможно добавление к основному

сигналу управления сигнала, пропорционального зоне нечувствительности (в общем случае) [2], но в этом случае необходимо точно знать величину этой зоны, т.е. производить идентификацию, что невозможно осуществить в процессе эксплуатации данного устройства. Кроме того, момент сухого трения может меняться в процессе эксплуатации в широких пределах.

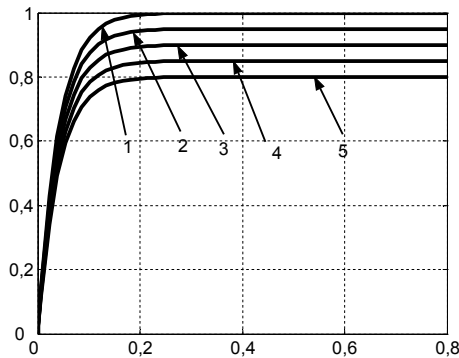


Рис. 2. Реакция системы (рис. 1) на функцию Хевисайда при различных значениях величины a

Традиционным способом уменьшения влияния нелинейности типа «зона нечувствительности» является использование в цепи обратной связи элемента с большим коэффициентом передачи k_{OC} [3]. Но за счет увеличения k_{OC} , во-первых, уменьшается общий коэффициент передачи замкнутой системы, т.е. для изменения состояния выходного параметра объекта управления потребуется больший управляющий сигнал, а во-вторых, уменьшается запас устойчивости замкнутой системы по амплитуде, и при критическом значении кругового коэффициента передачи система может потерять устойчивость.

Вторым способом компенсации статической ошибки является введение в управление интегрирующей составляющей [4], но при этом быстродействие замкнутой системы уменьшается, и при реакции на линейно меняющийся входной сигнал также будет присутствовать статическая ошибка.

В последнее время, благодаря быстрому развитию вычислительной техники, появились новые методы компенсации нелинейностей с использованием

адаптивных робастных алгоритмов на основе метода разрывных проекций и использования функции Ляпунова [5]. Однако такой подход имеет достаточно сложную реализацию и предусматривает необходимость проверки работоспособности в реальном масштабе времени. Поэтому предпочтительной является схема компенсационного управления, представленная на рис. 3, особенностью которой является наличие динамического компенсатора возмущений (ДКВ).

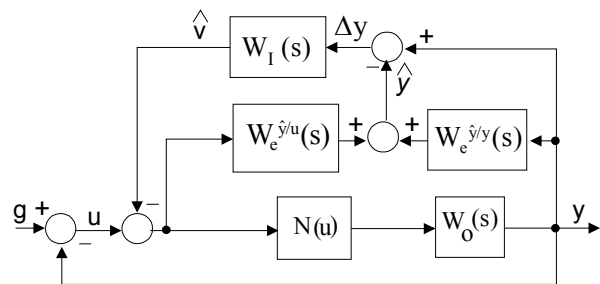


Рис. 3. Структурная схема двухконтурного управления с нелинейным объектом

На схеме обозначено:

$W_O(s)$ – передаточная функция ДЭ;

$W_e^{\hat{y}/u}(s)$, $W_e^{\hat{y}/y}(s)$ – передаточные функции на-

блюдателя по состоянию и выходу соответственно;

$W_I(s)$ – ПФ итерационно-инверсного фильтра;

$G(s)$ – s-преобразование сигнала задающего воздействия;

$U(s)$ – s-преобразование сигнала управления;

$\tilde{V}(s)$ – s-преобразование эквивалентного возмущения;

$Y(s)$ – s-преобразование реального выхода ИУ;

$\hat{Y}(s)$ – s-преобразование оценки выхода;

$\Delta Y(s) = Y(s) - \hat{Y}(s)$ – s-преобразование ошибки оценки выхода;

$\hat{V}(s)$ – s-преобразование оценки эквивалентного возмущения;

$\Delta U(s)$ – s-преобразование дополнительного сигнала управления, $\Delta U(s) = -\hat{V}(s)$.

Итак, ставится задача исследования возможности применения динамического компенсатора возмущений для компенсации влияния нелинейностей ДЭ с целью улучшения показателей качества.

Условие компенсации влияния нелинейностей ДЭ с помощью динамических компенсаторов

Рассмотрим задачу построения компенсационного управления нелинейного исполнительного устройства, представленного операторным уравнением

$$y(t) = W^u N(u(t)), \quad (1)$$

где $y(t)$ – выход объекта управления; $\dim(y(t)) = 1$; $u(t)$ – вход объекта управления; $\dim(u(t)) = 1$; W^u – оператор линейной динамической части исполнительного устройства; $N(u(t))$ – оператор нелинейной статической части.

Номинальную модель исполнительного устройства примем линейной, которая в операторном виде имеет вид

$$y_n(t) = W^u K_n u(t), \quad (2)$$

где статическая часть представлена множителем K_n , а динамические операторы нелинейного ИУ и номинальной модели принимаем совпадающими. Следует отметить, что номинальная модель ДЭ должна быть достижимой [6].

Представим сигнал управления в виде

$$u(t) = u_n(t) + \Delta u(t), \quad (3)$$

где $u_n(t)$ – сигнал управления основного контура управления; $\Delta u(t)$ – сигнал дополнительного управления, сформированного контуром компенсации.

В соответствии с приведенной схемой (рис. 3), сигнал дополнительного компенсационного управления $\Delta u(t)$ формируется с учетом выхода итерационно-инверсного фильтра восстановления возмущения, причем $\hat{y}(t)$ – оценка выхода объекта, полученная на основе наблюдателя состояния вида

$\hat{y}(t) = W_e^{\hat{y}/u} u(t) + W_e^{\hat{y}/y} y(t)$, в котором обозначены:

$$W_e^{\hat{y}/u}(s) = C(sI - A + LC)^{-1} B_u + D_u,$$

$$W_e^{\hat{y}/y}(s) = C(sI - A + LC)^{-1} L.$$

Сигнал компенсационного управления в замкнутой системе определяется из следующего операторного уравнения, получаемого в соответствие со структурной схемой двухконтурного управления (рис. 3):

$$(I - W_I W_e^{\hat{y}/u}) \Delta u(t) = W_I (I - W_e^{\hat{y}/y}) * \\ * [W^u N(u_n(t) + \Delta u(t)) - \\ - W^u K_n u_n(t)]. \quad (4)$$

Если принять $W_I = [W_e^{\hat{y}/u}]^{-1}$, что возможно при выполнении условий инверсии оператора или обратимости системы по входу [6], то уравнение (4) упрощается до взаимосвязи статических характеристик:

$$N(u_n(t) + \Delta u(t)) - K_n u_n(t) = 0.$$

При невозможности точной инверсии можно ограничиться итеративной инверсией, которая в пространстве состояния имеет несложную вычислительную реализацию, но позволяет приблизить решение итерациями с необходимой точностью. Выбор настроечной матрицы наблюдателя L и синтез итерационно-инверсного фильтра W_I , обеспечивающего восстановление эквивалентного возмущения для дальнейшей его компенсации, производится по методике, приведенной в [6].

Компенсация влияния нелинейностей ДЭ

Математическая модель ДЭ представлена в виде дифференциальных уравнений:

$$J \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} + K_v \frac{d \alpha(t)}{dt} + \\ + M_{mp} \operatorname{sign} \left(\frac{d \alpha(t)}{dt} \right) = K_i \cdot i(t); \quad (5)$$

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + C_e \frac{d \alpha(t)}{dt} = u(t), \quad (6)$$

где $\alpha(t)$ – угол поворота дозирующего элемента; $i(t)$ – ток в обмотке управления; $U(t)$ – напряжение на обмотке управления; J – момент инерции дозатора; R – сопротивление обмотки преобразователя; L – индуктивность обмотки; K_i – коэффициент крутящего момента; C_e – коэффициент обратной ЭДС; K_v – коэффициент вязкого трения; M_{mp} – момент сухого трения.

В этом случае нелинейность объекта представим следующем виде:

$$N(u(t)) = \begin{cases} K(u(t) - \Delta u_{dz}(t)), & u(t) > 0; \\ K(u(t) + \Delta u_{dz}(t)), & u(t) < 0, \end{cases}$$

а для НМ принимаем $N_H(u(t)) = K_H u(t)$. Запишем для данного типа нелинейности операторное уравнение:

$$\begin{cases} W^u(u_H(t) + \Delta u(t) - \Delta u_{dz}(t)) - \\ - W^u u_H(t) = 0, & u(t) > 0; \\ W^u(u_H(t) + \Delta u(t) + \Delta u_{dz}(t)) - \\ - W^u u_H(t) = 0, & u(t) < 0. \end{cases}$$

Решение последнего уравнения имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta u(t) = \Delta u_{dz}(t), & u(t) > 0; \\ \Delta u(t) = -\Delta u_{dz}(t), & u(t) < 0, \end{cases}$$

Подстановка данного решения в выход объекта дает

$$y(t) = \begin{cases} W^u(u_H(t) + \Delta u_{dz}(t) - \\ - \Delta u_{dz}(t)), & u(t) > 0; \\ W^u(u_H(t) - \Delta u_{dz}(t) + \\ + \Delta u_{dz}(t)), & u(t) < 0, \end{cases}$$

т.е. $y(t) = W^u u_H(t)$.

Таким образом, получаем совпадение выходов НО и НМ и тем самым обеспечиваем компенсацию рассматриваемой нелинейности.

На рис. 4 представлена схема моделирования ДЭ с ДКВ.

На рис. 5 представлены результаты компенсации нелинейности с применением итерационно-инверсного фильтра.

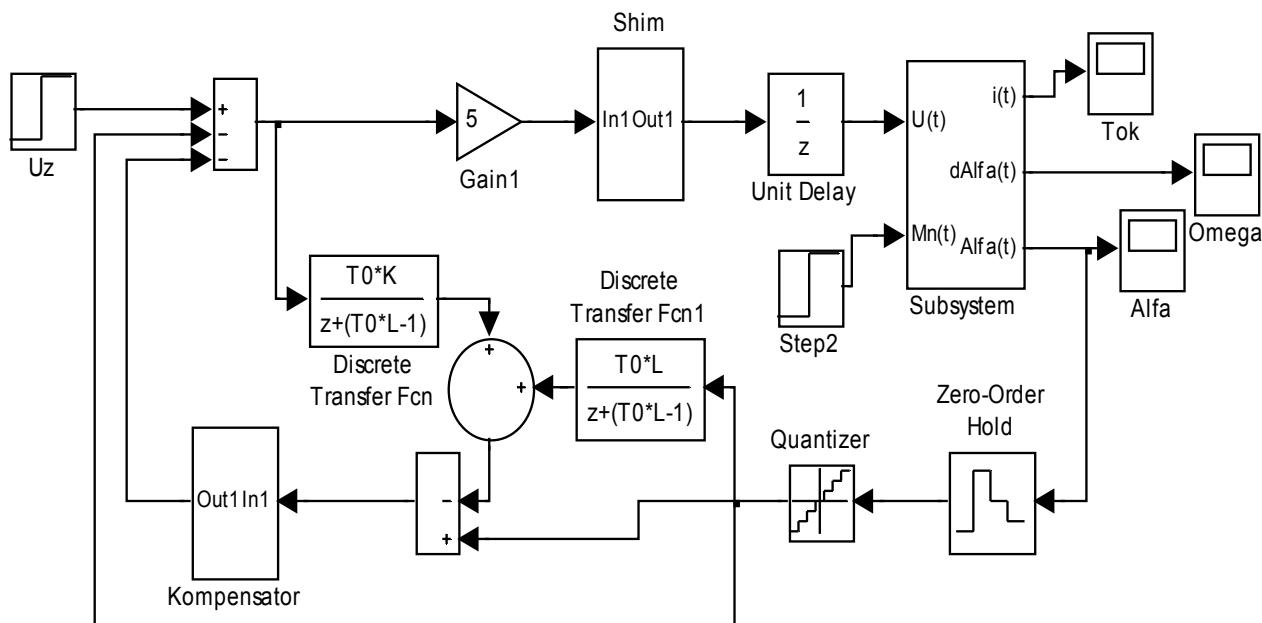


Рис. 4. Схема моделирования системы в MatLab-Simulink

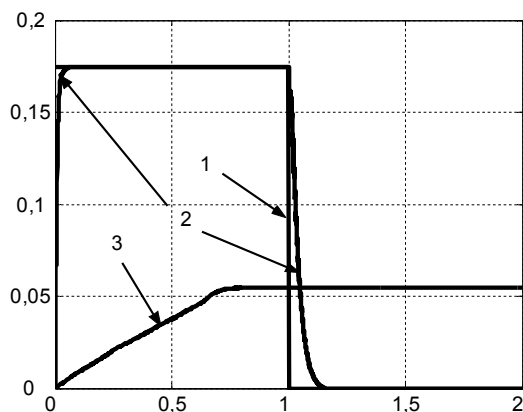


Рис. 5. Реакция системы при различных величинах сухого трения

На рис. 5 введены следующие обозначения: 1 – входное воздействие; 2 – реакция объекта при наличии сухого трения и итерационно-инверсного фильтра, который компенсирует влияние неизмеряемого внешнего возмущения; 3 – реакция ДЭ при наличии сухого трения и отсутствии компенсатора неизмеряемых возмущений. Таким образом, для тех же значений объекта управления переходный процесс 1 аналогичен графику 2 на рис. 5, т.е. объект с различными зонами нечувствительности, замкнутый вторым дополнительным контуром, обладает нулевой статической ошибкой. Следовательно, зона нечувствительности объекта управления с компенсационной связью компенсируется полностью.

Заключение

На основании анализа способов компенсации влияния неидеальностей исполнительных устройств установлено, что введение нелинейных дополнительных звеньев с обратной характеристикой либо формирование дополнительного сигнала коррекции, нейтрализующего влияние нелинейности, усложняют структуру исполнительных устройств и требуют точного знания параметров нелинейностей.

Задача компенсации влияния неидеальностей ДЭ решается за счет формирования дополнительного сигнала управления, сформированного на основе

восстановления вектора рассогласования реального исполнительного устройства и номинальной достижимой линейной модели ИУ. Предложенный алгоритм управления может быть использован для создания высокоточных систем автоматического управления силовыми установками ЛА.

Дальнейшие исследования предусматривают проведение этапа полунатурного моделирования САУ ГТД с реализацией ДКВ на микропроцессоре для реализации управления в реальном масштабе времени.

Литература

1. Кулик А.С., Симонов В.Ф., Комков А.В., Остроумов Б.В., Китайчук И.Е. Машинное моделирование системы автоматического управления газотурбинным двигателем // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – №8 (16). – С. 122-126.
2. Зайцев Г.В., Стеклов В.А. Компенсация естественных нелинейностей автоматических систем. – М.: Энергоиздат, 1982. – 96 с.
3. Динамика следящих приводов / Под ред. Л.В. Рабиновича. – М.: Машиностроение, 1982. – 496 с.
4. Зотов М.Г. Конструирование управляющих устройств для нелинейных объектов // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2002. – № 2. – С. 36-32.
5. Xu L., Yao B. Output feedback adaptive robust precision motion control of linear motors // *Automatica*. – 2001. – Vol. 37, № 7. – P. 1029-1039.
6. Кортунов В.И. Итерационный метод восстановления возмущений в линейных стационарных динамических системах реального времени // *Теория и системы управления*. – 2003. – № 2. – С. 47-52.

Поступила в редакцию 17.01.2007

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