

УДК 62-61.189.2

Е.В. ПАВЛЮК¹, Ю.И. КРАВЧЕНКО¹, С.В. ЕПИФАНОВ², С.И. СУХОВЕЙ²¹ ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМАХ ДОЗИРОВАНИЯ ТОПЛИВА РАЗРАБОТКИ ГП «ХАКБ»

Приведен анализ преимуществ использования шагового электродвигателя в системах дозирования топлива авиационных ГТД. Рассмотрена схема привода дозирующего элемента. Повышение перестановочных усилий достигнуто за счет использования понижающей зубчатой рядной передачи. Показано, что за счет исключения зоны нечувствительности и оптимального выбора передаточного отношения обеспечено высокое качество процессов регулирования в контуре расхода топлива. Моделирование переходных процессов в САУ ТВаД с дозатором на основе шагового двигателя показало существенное повышение качества регулирования по сравнению с традиционным дозатором на основе использования электрогидравлического преобразователя сигналов

Ключевые слова: авиационный двигатель, САУ, дозатор топлива, шаговый двигатель, привод, качество регулирования.

Введение

ГП «ХАКБ» широко использует в своих разработках дозирующие элементы (ДЭ) на основе плоского золотника с прямым приводом от электромеханического преобразователя. В первую очередь это касается насосов-дозаторов для небольших вспомогательных и маршевых ГТД с расходами топлива до 200 кг/ч. Использование прямого привода позволяет существенно упростить конструкцию дозатора по сравнению с традиционными схемами на основе электрогидравлических преобразователей сигналов (гидравлических усилителей), обеспечивая при этом возможность силового подключения гидромеханического резерва при отказе основного электронного контура управления [1]. Вместе с тем, несмотря на конструктивную простоту привода, его использование с ДЭ на основе плоского золотника существенно усложняет задачу управления, поскольку величина сил сухого трения по отношению к максимальному перестановочному усилию электромеханического преобразователя может составлять 30% и более. Это приводит к необходимости компенсации большой и переменной по величине зоны нечувствительности в контуре управления и, как следствие, к заметным колебаниям ДЭ и пульсациям расхода топлива.

Вместе с тем в наземной технике ГП «ХАКБ», также как и другие разработчики топливной автоматики, использует шаговые электродвигатели (ШД), в частности, в дозаторах газа. Примером такого использования является разработанный ГП «ХАКБ» и серийно изготавливаемый ПАО «ВАЗ» дозатор газа

ДГ-97 и его модификации [2]. Многолетняя эксплуатация подтвердила высокую надежность и ресурсные показатели дозаторов газов, при этом достигнутые наработки составляют десятки тысяч моточасов до ремонта.

В статье представлен анализ преимуществ использования шагового электропривода для привода ДЭ насоса-дозатора для ТВаД с максимальным расходом топлива 250-300 кг/ч.

1. Описание конструктивной схемы насоса-дозатора с приводом от ШД

Рассматриваемый насос-дозатор НДТ500 (рис.1) включает в себя ДЭ на основе плоского поворотного золотника с приводом от ШД. Привод выполнен в виде рядной зубчатой передачи с передаточным отношением 1:7.

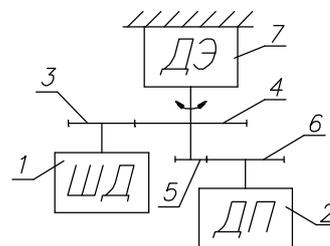


Рис. 1. Конструктивная схема ДЭ насоса-дозатора НДТ500 с приводом от ШД

- 1 – шаговый двигатель; 2 – датчик положения ДЭ;
3 – шестерня ШД; 4 – шестерня привода ДЭ;
5, 6 – шестерни привода датчика положения;
7 – дозирующий элемент

Величина передаточного отношения оптимизирована по критерию минимальных массогабаритных характеристик привода при условии обеспечения заданных перестановочных усилий на ДЭ. Максимальный угол поворота ДЭ составляет около 40 градусов, поэтому достаточно большое передаточное отношение привода позволяет не только повысить перестановочное усилие на ДЭ, но и увеличить число рабочих шагов для обеспечения плавности регулирования положения ДЭ. В качестве прототипа шагового электродвигателя использован одноканальный униполярный серийный ШД. Для обеспечения двухканальности управления обмотки ШД разделены, а управление каждым каналом переведено в биполярный режим.

Основные характеристики дозатора и ШД:

- максимальный расход топлива – 300 кг/ч;
- максимальный крутящий момент, приведенный к ДЭ – 0,7 Нм;
- угловой шаг ШД – 0,9 градуса;
- количество полных шагов ШД при дозировании топлива – 252;
- максимальная частота следования шагов в полношаговом режиме – 7000 Гц.

Для повышения плавности работы и точности дозирования топлива предусмотрено деление шага в отношении 1:4. Как известно, многие системы с ШД работают без обратной связи, однако в связи с вероятностью пропуска шагов и перебоев в питании для замыкания обратной связи и получения данных по расходу топлива в насосе-дозаторе используются два одноканальных датчика 45Д32Б.

2. Анализ результатов испытаний насоса-дозатора с ШД на безмоторном стенде

На рис. 2 – 4 показаны результаты испытаний насоса-дозатора с ШД на безмоторном стенде ГП «ХАКБ» при отработке пилообразного управляющего воздействия амплитудой 80% от максимального значения. Испытания проводились с блоком управления БУК-500-1 разработки ПАО «НТК «Электронприлад» на вибростенде во всем диапазоне частот вращения привода насоса-дозатора с подачей топлива и имитацией комплекта форсунок и противодавления в камере сгорания.

Как следует из представленных рисунков, насос-дозатор обрабатывает пилообразное управляющее воздействие амплитудой 80% от максимального значения с минимальным искажением вплоть до частоты 1,5 Гц с выходом на максимальную частоту следования шагов ШД. Воздействие вибраций, в том числе на резонансных частотах, заметного влияния на работу насоса-дозатора не оказывает.

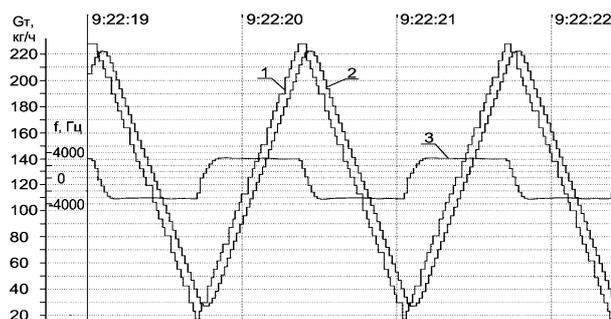


Рис. 2. Работа замкнутого контура управления подачей топлива в составе НДТ500 и БУК-500-1 при частоте входного сигнала 0,75 Гц: 1 – заданный расход, кг/ч; 2 – фактический расход (положение ДЭ), кг/ч; 3 – частота следования шагов, Гц

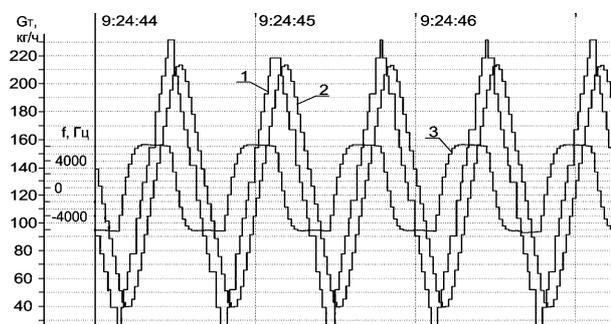


Рис. 3. Работа замкнутого контура управления подачей топлива в составе НДТ500 и БУК-500-1 при частоте входного сигнала 1,5 Гц: 1 – заданный расход, кг/ч; 2 – фактический расход (положение ДЭ), кг/ч; 3 – частота следования шагов, Гц

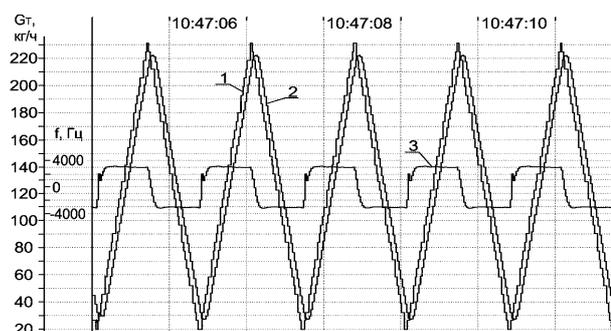


Рис. 4. Работа замкнутого контура управления подачей топлива в составе НДТ500 и БУК-500-1 при частоте входного сигнала 0,75 Гц в условиях воздействия внешних вибраций: 1 – заданный расход, кг/ч; 2 – фактический расход (положение ДЭ), кг/ч; 3 – частота следования шагов, Гц

Дополнительно была проведена проверка работоспособности насоса-дозатора в условиях воздействия пониженных температур до -60°C со стендовой системой управления ШД. Замечаний и отклонений от нормальной работы не выявлено.

3. Анализ преимуществ использования насоса-дозатора на основе ШД в САУ ТВаД по результатам математического моделирования

Был выполнен анализ динамики контура поддержания частоты вращения ротора свободной турбины (СТ) ТВаД с двумя типами дозаторов топлива: с преобразователем сигналов и с ШД.

В линейном приближении динамика роторов ТВаД с одновальным газогенератором представляется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (T_{TK}s+1)\bar{n}_{TK} = k_{11}\bar{G}_T + k_{12}\bar{n}_{CT}; \\ (T_{CT}s+1)\bar{n}_{CT} = k_{21}\bar{G}_T + k_{22}\bar{n}_{TK}, \end{cases}$$

где \bar{n}_{TK} , \bar{n}_{CT} – относительные частоты вращения роторов турбокомпрессора (ТК) и СТ; T_{TK} , T_{CT} – постоянные времени роторов; k_{11} , k_{21} , k_{12} , k_{22} – коэффициенты усиления.

Коэффициентом k_{12} пренебрегаем, учитывая слабое влияние ротора СТ на ротор ТК. Структурная схема ротора СТ как объекта регулирования приведена на рис. 5.

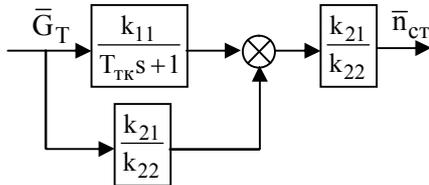


Рис. 5. Структурная схема свободной турбины как объекта регулирования

Дозатор топлива на основе преобразователя сигналов моделировался аperiodическим звеном. Дозирующий элемент с приводом от ШД представлялся интегрирующим звеном, входом которого являлось произведение частоты следования шагов (выходной параметр алгоритма управления подачей топлива) на величину шага. В моделях обоих дозаторов динамика клапана постоянного перепада давления не учитывалась, так как она существенно выше динамики дозирующей иглы. При максимальном значении управляющего воздействия дозирующие элементы перемещались от нижнего до верхнего механических упоров за время 1,0 и 0,3 с соответственно для дозатора с преобразователем сигналов и с ШД.

В контурах стабилизации дозаторов использовался П-регулятор. Выбор параметров регуляторов осуществлялся из условия обеспечения близких значений запасов устойчивости. Динамика замкнутых контуров стабилизации насосов-дозаторов в даль-

нейших исследованиях представлялась эквивалентными аperiodическими звеньями с параметрами КДТ, ТДТ.

Исследовался контур регулирования частоты вращения СТ с П-регулятором (рис. 6).

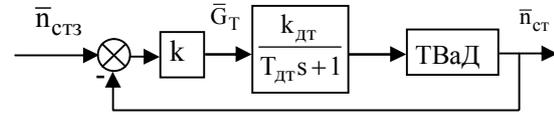


Рис. 6. Структура замкнутого контура регулирования частоты вращения контура СТ

Синтез контуров регулирования был выполнен с помощью корневых годографов [3]. На рис. 7 приведены корневые годографы для систем с двумя типами дозаторов.

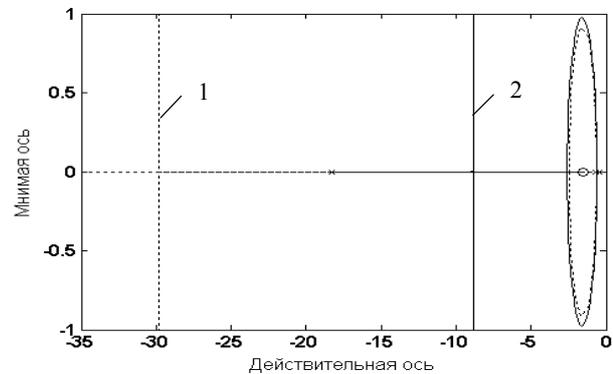


Рис. 7. Корневые годографы замкнутого контура регулирования: 1 – дозатор с ШД; 2 – дозатор с преобразователем сигналов

Наилучшее качество переходного процесса обеспечивается при расположении от двух из трех корней характеристического уравнения в окрестности точки пересечения вертикальной и горизонтальной траекторий. Очевидно, что для системы с ШД время переходного процесса существенно меньше (рис. 8), так как действительные части корней в три раза больше по абсолютной величине в сравнении с альтернативной системой.

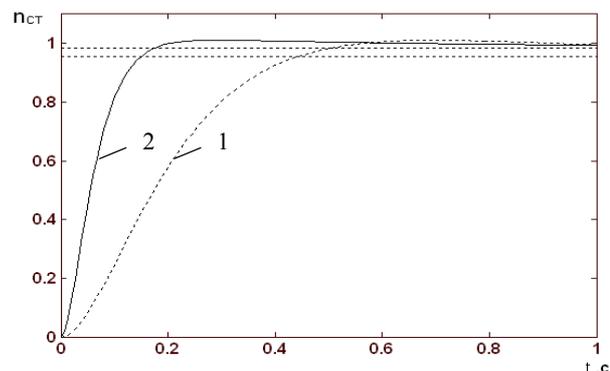


Рис. 8. Переходные характеристики по n_{CT} в ТВаД: 1 – дозатор с ШД; 2 – дозатор с преобразователем сигналов

Учет конечной мощности приводов дозирующих элементов и наличия зоны нечувствительности в традиционной схеме дозатора приведет к еще большей разнице во времени переходных процессов.

Заключение

Применение ШД для прямого привода ДЭ насоса-дозатора по сравнению с традиционными схемами на основе преобразователей сигналов позволяет существенно улучшить качество регулирования в САУ ТВаД за счет исключения зоны нечувствительности и более высокой динамики привода. При этом параметры и характеристики дозатора на основе ШД не изменяются в процессе эксплуатации.

Поступила в редакцию 12.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

ЗАСТОСУВАННЯ КРОКОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У СИСТЕМАХ ДОЗУВАННЯ ПАЛИВА РОЗРОБКИ ДП «ХАКБ»

Є.В. Павлюк, Ю.І. Кравченко, С.В. Єніфанов, С.І. Суховій

Наведено аналіз переваг використання крокового електродвигуна в системах дозування палива авіаційних ГТД. Розглянуто схему приводу дозуючого елементу. Підвищення перестановочних зусиль досягнуто за рахунок використання знижуючої зубчастої рядної передачі. Показано, що за рахунок виключення зони нечуттєвості та оптимального вибору передатного відношення забезпечена висока якість процесів регулювання у контурі витрати палива. Моделювання перехідних процесів у САУ ТВаД з дозатором на основі крокового двигуна показало суттєве підвищення якості керування у порівнянні з традиційним дозатором на основі використання електрогідравлічного перетворювача сигналів.

Ключові слова: авіаційний двигун, САУ, дозатор палива, кроковий двигун, привід, якість керування.

APPLICATION OF THE STEPPER DRIVE IN THE FUEL METERING SYSTEMS DEVELOPED BY SE "KhADB"

Y.V. Pavlyuk, Y.I. Kravchenko, S.V. Yepifanov, S.I. Sukhovey

An analysis of advantages of using a stepper motor in fuel metering systems of aircraft GTE is given. The scheme of the drive of the metering device is considered. Increase of the driving force is provided through the use of the reduction gear. It is shown that due to the exclusion of a dead zone and the optimal choice of gear ratio the high-quality of regulation in the fuel metering control loop is achieved. Modeling of transient processes in the automatic control system of the turbo-shaft engine with fuel metering device on the basis of the stepper motor has showed a significant improvement of the quality of regulation in comparison with the traditional fuel metering device on the basis of the use of electro hydraulic signal converter.

Key words: aircraft engine, automatic control system, fuel metering device, stepper motor, drive, quality of regulation.

Павлюк Евгений Викторович – канд. техн. наук, первый заместитель главного конструктора-директора ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро", Харьков, Украина, e-mail: pav_ev@ukr.net.

Кравченко Юрий Игнатьевич - заместитель Главного конструктора ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро", Харьков, Украина, e-mail: khadb_ykr@ukr.net.

Елифанов Сергей Валериевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Суховой Сергей Иванович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Литература

1. Пат. 45563 Украина, МПК F 02 C 9/26. Система подачи топлива в газотурбинный двигатель [Текст]/ Мокроуз В.К., Павлюк Е.В., Кравченко Ю.И., Горбатюк Н.В., заявитель и патентообладатель Харьковское агрегатное конструкторское бюро. - № 2001010064; заявл. 03.01.01; опубл. 15.04.04, Бюл. № 4.

2. Пат. 39375 Украина, МПК F 01 L 7/06. Распределитель [Текст]/ Мокроуз В.К., Кравченко Ю.И., Горбатюк Н.В., Павлюк Е.В., заявитель и патентообладатель Харьковское агрегатное конструкторское бюро. - № 2000063556; заявл. 20.06.00; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.

3. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст]: пер. с англ. / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.