

УДК 629.7.03:681.518.7

Е.В. ПАВЛЮК¹, С.В. ЕПИФАНОВ², С.И. СУХОВЕЙ², Р.Л. ЗЕЛЕНСКИЙ²¹ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Харьков, Украина²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

СОГЛАСОВАНИЕ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗАЦИЕЙ СЛУЖЕБНОГО КОМПРЕССОРА С КОНТУРОМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГДУ КОМПРЕССОРА ВСУ

Приведен анализ влияния контура управления механизацией служебного компрессора ВСУ на контур управления подачей топлива в камеру сгорания в системе с отбором топлива с выхода качающего узла насоса-дозатора. С помощью разработанной математической модели системы выявлено, что при быстрой остановке выходных звеньев агрегатов механизации компрессора возникает кратковременное увеличение расхода топлива в камеру сгорания, которое приводит к снижению запасов ГДУ компрессора газогенератора. По результатам математического моделирования даны рекомендации для формирования контура управления агрегатами механизации компрессора. Необходимые запасы ГДУ компрессора обеспечиваются выбором соответствующего ускорения при замедлении агрегата. Результаты исследования были использованы при разработке САУ двигателя АИ-450-МС.

Ключевые слова: ВСУ, служебный компрессор, агрегаты управления механизацией компрессора, алгоритмы управления механизацией компрессора, запасы ГДУ.

Введение

Для достижения высокой эффективности современных ГТД их компрессоры снабжаются средствами механизации. В служебном компрессоре вспомогательной силовой установки (ВСУ) применение поворотного входного направляющего аппарата (ВНА) позволяет улучшить топливную эффективность, а клапан перепуска воздуха (КПВ) обеспечивает требуемые запасы газодинамической устойчивости (ГДУ) на всех режимах работы. Требование минимизации массы агрегатов предопределяет необходимость использования одного качающего узла (узла насоса-дозатора) для подачи топлива в камеру сгорания, а также к агрегатам управления ВНА и КПВ.

В рассматриваемой в данной статье системе дозирование топлива в камеру сгорания осуществляется дозирующим элементом на основе поворотного плоского золотника с непосредственным приводом от электромеханического преобразователя (ЭМП). Требуемая расходная характеристика дозатора обеспечивается клапаном постоянного перепада давления (КППД или регулятор расхода) на дозирующем сечении за счет перепуска избытка топлива с выхода объемного нерегулируемого насоса высокого давления на его вход. Отборы топлива на управление механизацией служебного компрессора осуществляются с выхода насоса. В агрегатах механизации реализован релейный способ управления на

основе электромагнитных клапанов, обеспечивающий максимальные скорости перемещения исполнительных механизмов.

Для обеспечения необходимого быстродействия агрегатов управления механизацией компрессора величина отборов топлива составляет 40-50% от расхода топлива в основную камеру сгорания на максимальном режиме работы ВСУ. Динамика регулятора расхода топлива, являющегося составной частью дозатора топлива, описывается инерционным звеном первого порядка с постоянной времени до 0,1 с. При такой динамике топливного дозатора резкие изменения отборов топлива за насосом, обусловленные перемещением и остановкой элементов механизации служебного компрессора, оказывают значительное влияние на дозирование топлива и запасы ГДУ компрессора газогенератора ВСУ.

В статье выполнена оценка влияния контуров управления механизацией служебного компрессора на контур управления подачей топлива и ГДУ ВСУ, а также даны рекомендации для синтеза алгоритмов управления агрегатами механизации служебного компрессора ВСУ.

1. Математическая модель системы

Для моделирования динамики ВСУ использовалась линейная динамическая математическая модель [1], дополненная экспериментально-расчетной моделью процесса запуска [2].

Математическая модель ЭМП дозатора топлива представлялась следующим дифференциальным уравнением:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_v \frac{d\alpha}{dt} = K_i \cdot i, \quad (1)$$

где α – угол поворота ротора, i – ток управления; J – момент инерции ротора; K_v , K_i – коэффициенты вязкого трения и крутящего момента.

Уравнение замыкания контура управления подачей топлива – пропорционально-дифференциальный закон управления с аддитивной осциллирующей составляющей [3]:

$$i = k_p (\alpha_0 - \alpha_n) - k_d \frac{\Delta \alpha_n}{T} + S_{\text{осц}}, \quad (2)$$

где α_0 , α_n – заданное и измеренное (с учетом запаздывания на период квантования и шумов в канале измерения) значения угла поворота ротора; $\Delta \alpha_n$ – приращение угла за последний период квантования по времени; T – величина периода квантования по времени; k_p , k_d – коэффициенты пропорциональной и дифференциальной составляющих закона управления; $S_{\text{осц}}$ – осциллирующая составляющая.

Заданное значение α_0 определяется пропорционально-интегральным законом поддержания частоты вращения ротора силовой турбины [4]:

$$\alpha_0 = k_{\text{Пн}} \Delta n_{\text{СТ}} + k_{\text{Ин}} \int \Delta n_{\text{СТ}} dt, \quad (3)$$

где $\Delta n_{\text{СТ}}$ – рассогласование между заданным и измеренным значениями частоты вращения ротора силовой турбины; $k_{\text{Пн}}$, $k_{\text{Ин}}$ – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих закона управления.

Рассчитанный по датчику положения дозирующего элемента расход топлива

$$G_T = K_G \alpha_0, \quad (4)$$

где K_G – масштабный коэффициент.

Математическая модель исполнительных гидроцилиндров агрегатов механизации компрессора при релейном управлении без участков разгона и торможения задавалась в следующем виде:

$$\begin{cases} V = V_{\text{max}}, & \text{если } j=1; \\ V = -V_{\text{max}}, & \text{если } j=-1; \\ V=0, & \text{если } j=0, \end{cases} \quad (5)$$

где j – дискретная команда на перемещение гидроцилиндра; V – скорость перемещения штока гидроцилиндра; V_{max} – максимальная скорость перемещения штока гидроцилиндра.

Отбор топлива от насоса на перемещение гидроцилиндра агрегата:

$$G_{\text{отб}} = K_{\text{ГЦ}} |V|, \quad (6)$$

где $K_{\text{ГЦ}}$ – коэффициент, учитывающий расход топлива на заполнение гидроцилиндра при перемещении поршня.

Параметры гидроцилиндров ВНА и КПВ близки, поэтому в их моделях использовались одинаковые значения $K_{\text{ГЦ}}$.

Математическая модель насоса представлялась следующей зависимостью:

$$G_H = K_H n_{\text{ТК}}, \quad (7)$$

где G_H – расход топлива на выходе из насоса; K_H – коэффициент производительности насоса; $n_{\text{ТК}}$ – частота вращения ротора турбокомпрессора.

Динамическая модель клапана постоянного перепада давления (КППД) на дозирующем сечении:

$$T_{\text{КППД}} \frac{dG_{\text{КППД}}}{dt} + G_{\text{КППД}} = G_H - G_T - G_{\text{отб}}, \quad (8)$$

где $G_{\text{КППД}}$ – расход через КППД в слив (слив избытка топлива); $T_{\text{КППД}}$ – постоянная времени КППД.

Фактический расход топлива в двигатель:

$$G_{\text{ТФ}} = G_H - G_{\text{отб}} - G_{\text{КППД}}. \quad (9)$$

В связи с малыми размерами двигателя упругость трубопроводов в математической модели не учитывалась.

2. Результаты моделирования

На рис. 1 приведено изменение фактического расхода топлива в камеру сгорания ВСУ при мгновенном старте и останове штока гидроцилиндра ВНА.

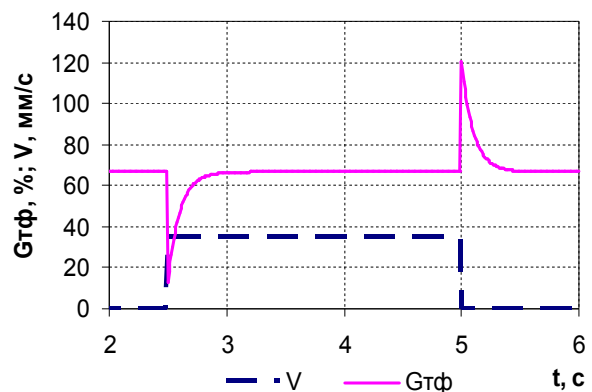


Рис. 1. Изменение фактического расхода топлива в камеру сгорания при мгновенном старте и останове штока гидроцилиндра ВНА

В моменты страгивания и останова наблюдаются кратковременные скачки по расходу топлива. Их длительность определяется постоянной времени КППД. Эти скачки несут существенно проявляются в частотах вращения роторов даже при максимальном значении $T_{кппд} = 0,1$ с. Однако резкое увеличение расхода топлива может привести к недопустимому уменьшению запасов ГДУ компрессора.

Для парирования этой ситуации эффективным может быть замедление темпа разгона и останова за счет соответствующих настроек контура управления механизацией компрессора. На рис. 2 приведено изменение расхода топлива и запасов ГДУ для трех темпов замедления ВНА: резкий останов, ускорение $a = -500$ мм/с² и $a = -250$ мм/с².

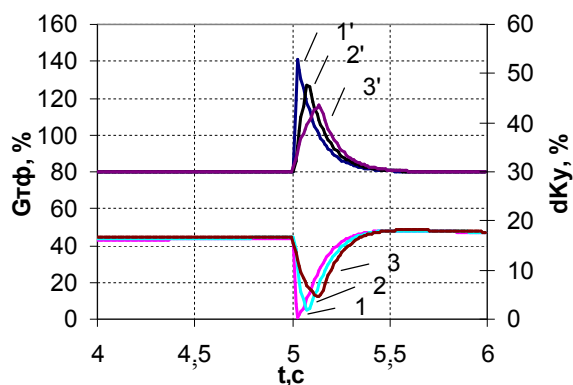


Рис. 2. Изменение расхода топлива (1', 2', 3') и запасов ГДУ компрессора (1, 2, 3): 1, 1' – резкий останов; 2, 2' – $a = -500$ мм/с²; 3, 3' – $a = -250$ мм/с²

3. Анализ результатов и внедрение результатов исследования

Мгновенный останов исполнительных механизмов ВНА или КПВ приводит к полному исчерпанию запасов ГДУ компрессора газогенератора. Замедление темпа останова до ускорения -250 мм/с² позволило обеспечить $d_{Ky} = 4,5$ %.

Основываясь на результатах данного исследования, при разработке САУ двигателя АИ-450-МС в контур управления механизацией служебного компрессора был введен алгоритм, обеспечивающий равномерное и плавное изменение тока управления электромагнитных клапанов гидроцилиндра ВНА и КПВ с помощью широтной импульсной модуляции.

В исходном варианте системы был реализован релейный закон управления электромагнитными клапанами, что обеспечивало максимальные скорости перемещения агрегатов управления механизацией служебного компрессора.

Доработанные вариант системы предусматривал ступенчатое изменение тока в каждом такте управления. В зависимости от требуемого направления движения ток увеличивался или уменьшался до предельного максимального или минимального значения. При достижении предельного значения ток оставался постоянным, обеспечивая максимально возможную скорость перемещения ВНА или КПВ.

Нулевое значение тока для остановки агрегатов устанавливалось также ступенчато с тем же темпом, что и при страгивании.

Был выполнен анализ работы системы с различными значениями темпов изменения управляющего тока при начале движения и останове ВНА и КПВ. Влияние темпа изменения управляющего тока на расход топлива в камеру сгорания оценивалось по штатным измерениям давления топлива перед форсунками. Выбранная скорость изменения управляющего тока обеспечивала увеличение его до максимального значения и уменьшение до нуля за время, не превышающее 25 мс. Потери в скорости перемещения агрегатов механизации компрессора незначительны.

Такая доработка исключила возможность возникновения помпажей при останове исполнительных механизмов ВНА и КПВ, что было подтверждено в процессе стендовых испытаний и эксплуатации двигателя.

Литература

1. Куликов Г.Г. Метод определения динамических параметров ГТД в САПР-Д / Г.Г. Куликов, И.М. Горюнов, М.А. Романов // Испытание авиационных двигателей: межвуз. научн. сб. – Уфа: УАИ, 1986. – Вып. 14. – С. 39-46.
2. Экспериментально-расчетная методика построения линейной динамической математической модели процесса запуска ГТД / С.И. Суховой, С.В. Епифанов, Е.В. Павлюк, Т.В. Кулик // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9 (56). – С. 147-151.
3. Адаптивная САУ расходом топлива с приводом дозатора от электромеханического преобразователя / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой, С.Н. Емельянов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 4 (30). – С. 92-95.
4. Павлюк Е.В. Синтез контура управления частотой вращения свободной турбины вспомогательной силовой установки / Е.В. Павлюк, С.В. Епифанов, С.И. Суховой // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 8 (16). – С. 110-113.

Поступила в редакцию 12.05.2011

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

**УЗГОДЖЕННЯ КОНТУРА КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗАЦІЄЮ СЛУЖБОВОГО КОМПРЕСОРА
З КОНТУРОМ КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА
ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГДС КОМПРЕСОРА ДСУ**

Є.В. Павлюк, С.В. Епіфанов, С.І. Суховій, Р.Л. Зеленський

Наведено аналіз впливу контура керування механізацією службового компресора ДСУ на контур керування подачею палива в камеру згоряння у системі з відбором палива з виходу качаючого вузла насоса-дозатора. За допомогою розробленої математичної моделі системи виявлено, що при миттєвій зупинці агрегата виникає короткочасове збільшення витрати палива в камеру згоряння, котре призводить до зниження запасів ГДС компресора газогенератора. За результатами математичного моделювання надано рекомендації щодо формування контуру керування агрегатами механізації компресора. Необхідні запаси ГДС компресора забезпечуються вибором прискорення при сповільненні агрегату. Результати досліджень було використано при розробці САК двигуном АИ-450-МС.

Ключові слова: ДСУ, службовий компресор, агрегати керування механізацією компресора, алгоритми керування механізацією компресора, запаси ГДС.

**MATCHING OF THE AUXILIARY COMPRESSOR CONTROL CIRCUIT
WITH THE FUEL CONTROL CIRCUIT TO PROVIDE GAS-DYNAMIC
STABILITY OF THE APU TURBOCOMPRESSOR**

Y.V. Pavlyuk, S.V. Yepifanov, S.I. Sukhovey, R.L. Zelensky

The analysis of the impact of the operation of the APU auxiliary compressor control circuit on the combustion chamber fuel control circuit in the system with the use of the fuel from the fuel metering pump to control the compressor is given. With the use of the developed model of the system it was found that in the case of the instant stop of the compressor control actuator's output link the short-term increase of the fuel supply to combustion chamber takes place that leads to decrease of the gas-dynamic stability factor of the APU turbo-compressor. On the base of the simulation of the system the guidelines on the compressor control algorithm were given. The required gas-dynamic stability factor is provided by the choice of the appropriate deceleration before the stop of the actuator's output link. The results of the investigation were used during the development of the control system of the APU АИ-450-МС.

Key words: APU, auxiliary compressor, compressor control units, compressor control algorithm, gas - dynamic stability factor.

Павлюк Евгений Викторович – канд. техн. наук, заместитель Главного конструктора ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Харьков, Украина.

Епифанов Сергей Валериевич - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Суховой Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Зеленский Роман Леонидович – старший преподаватель кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.