

УДК 629.7.048 : 62-531.8

А.И. ХЛИСТУН¹, В.П. БОЧАРОВ¹, А.З. ГАНИЕВ², Т.А. ТЕРЕЩЕНКО³¹Национальный авиационный университет²Институт геофизики Национальной академии наук Украины³Ассоциация специалистов промышленной гидравлики и пневматики Украины

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА, ОТБИРАЕМОГО ОТ КОМПРЕССОРА ГТД

Приведено математическое описание цифрового регулятора параметров воздуха, отбираемого от компрессора ГТД, основанное на представлении динамики цифрового регулирующего устройства в виде разностного уравнения и использовании z-преобразования для получения передаточной функции регулятора. Сформулированы требования к стенду для функциональных испытаний и отработки параметров цифрового регулятора, приведены пневматическая схема стенда и интерфейс системы контроля и регистрации параметров. Приведены результаты функционального анализа цифрового регулятора пневматической системы самолета транспортной категории, проведенного с использованием компьютерно-интегрированного метода.

Ключевые слова: цифровой регулятор, пневматическая система самолета, регулирование параметров воздуха, компрессор ГТД.

Введение

При проектировании современных самолетов транспортной категории (СТК) возникает ряд задач создания необходимых физиологических условий и комфорта для пассажиров и экипажа, условий функционирования оборудования, элементов конструкции, грузов, защиты элементов конструкции самолета от обледенения. Решение указанных задач обеспечивает пневматическая система (ПС) самолета. Современные международные и федеральные Авиационные правила (АП-25, JAR-25, FAR-25) относят ПС самолетов транспортной категории к системам, непосредственно влияющим на безопасность полетов, предъявляют повышенные требования к ее функциональным характеристикам и надежности. В ПС устанавливается ряд САР параметров воздуха, отбираемого от двигателя: давления, температуры, расхода, рис. 1.

Функциональные характеристики и экономичность самолетных СКВ и ПОС непосредственно связаны с качеством процесса регулирования параметров воздуха, отбираемого от компрессора маршевых ГТД. Поэтому, при проектировании ПС являются актуальными вопросы функционального анализа САР этих параметров.

САР самолетных ПС являются регуляторами непрямого действия и имеют ряд существенных общих признаков:

– объект регулирования (ОР) – трубопровод (емкость), через который проходит поток воздуха;

– регулирующий орган (РО) – дросселирующее устройство (обычно заслонка);

– функциональная структурная схема: ДРП – регулирующее устройство (РУ) – исполнительный механизм (ИМ) – РО – ОР.

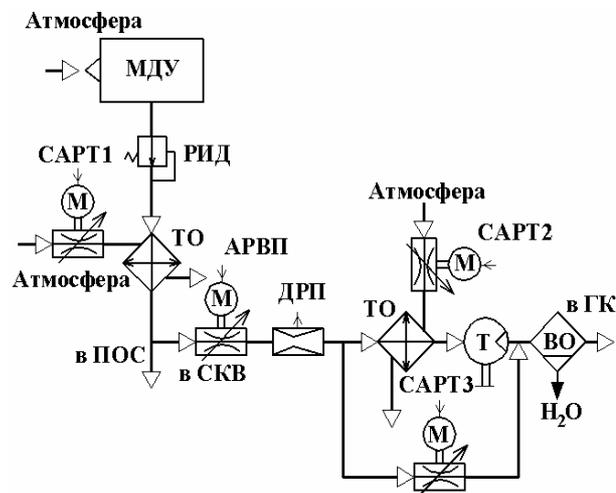


Рис. 1. Схема ПС самолета:

МДУ – маршевая двигательная установка;

РИД – регулятор избыточного давления;

САРТ – система автоматического регулирования (САР) температуры; М – исполнительный механизм;

ТО – теплообменник; ПОС – противообледенительная система; СКВ – система кондиционирования воздуха; АРВП – автомат регулирования весовой подачи; ДРП – датчик регулируемого параметра;

Т – турбоохладитель; ВО – влагоотделитель;

ГК – герметическая кабина

Для регулирования параметров воздуха в САР современных самолетных ПС применяются пневматические, электрические и цифровые РУ.

В настоящее время в основном применяются САР, с регулирующим устройством (РУ) на базе цифрового процессора, которые имеет следующие преимущества:

- возможность реализации закона регулирования практически любой сложности, с учетом условий и режима полета, и, соответственно, обеспечение высоких показателей качества регулирования и экономичности работы ПС;
- широкие возможности по автоматизации процесса регулирования и контроля системы;
- возможность совмещения нескольких САР в одном блоке;
- универсальная, достаточно доступная и недорогая элементная база;
- простая процедура коррекции закона регулирования в процессе стендовых и летных испытаний САР ПС самолета.

Вопросы проектирования и расчета регуляторов параметров воздуха в авиационных ПС возникли с началом широкого применения этих систем и их агрегатов [1, 2] для обеспечения высотных полетов. Теоретические основы расчета и проектирования сетевых регуляторов для авиационных ПС были заложены М.Д. Голубевым в работе [3]. В этой работе рассмотрены вопросы проектирования, главным образом, сетевых газовых регуляторов прямого действия, решается задача обеспечения динамической устойчивости таких регуляторов.

Вопросам улучшения функциональных показателей запорно-регулирующих устройств авиационных ПС, повышению их надежности за счет применения новых схемных и конструктивных решений при проектировании, методам испытаний и анализа их эксплуатационных изменений посвящены работы [4 – 6]. Авторами работы [7] изложены принципы построения непрерывных, дискретных и непрерывно-дискретных пневматических элементов, предназначенных для автоматизации СКВ ЛА.

Работы [8 – 13] посвящены математическому моделированию рабочего процесса современных авиационных систем регулирования параметров воздуха, отбираемого от компрессора ГТД, экспериментальному исследованию динамических характеристик их элементов, анализу показателей качества регулирования.

Анализ приведенных исследований и публикаций по вопросам проектирования, расчета и испытаний авиационных САР пневматических систем показывает, что практически отсутствуют работы по анализу функциональных характеристик цифровых регуляторов параметров воздуха, отбираемого от

компрессора ГТД.

В связи с разработкой цифровых САР самолетных ПС возникает необходимость решения ряда сложных научно-технических задач, в том числе: математического описания рабочих процессов, происходящих в объектах регулирования и исполнительных устройствах ПС; исследования статических и динамических характеристик цифровых САР. Однако, математическое моделирование не всегда дает достаточно точные результаты при определении характеристик процесса регулирования цифровых САР, поэтому параметры РУ определенные в результате математического моделирования должны уточняться в процессе стендовых испытаний.

Учитывая актуальность и важность задачи обеспечения высоких показателей качества процесса регулирования параметров воздуха в самолетных ПС за счет применения в них цифровых систем регулирования, рассмотрим принципы функционального анализа САР с цифровым РУ (ЦРУ) для ПС самолета.

1. Модель цифрового регулятора

На начальном этапе разработки САР ставится задача синтеза системы. Исходным условием решения задачи синтеза САР является наличие адекватной динамической математической модели объекта регулирования, точно определенных возмущающих и регулирующих воздействий.

САР с цифровым регулирующим устройством относится к типу импульсных систем автоматического регулирования [14], которые моделируются разностными уравнениями и их анализ и синтез основан на математический аппарате z -преобразований. В импульсных системах регулирующее устройство реализуется на базе цифрового процессора (ЦП).

Дискретный сигнал поступающий в ЦП через постоянный промежуток времени T имеет вид числовой последовательности

$$\{e(kT)\} \equiv e(0), e(T), e(2T) \dots$$

Дискретный сигнал $\{m(kT)\}$ на выходе ЦП определяется разностным уравнением вида:

$$\begin{aligned} m(k) + a_1 m(k-n) + \dots + a_n m(k-n) = \\ = b_0 e(k) + b_1 e(k-1) + \dots + b_n e(k-n), \end{aligned} \quad (1)$$

где n – порядок разностного уравнения.

Будем рассматривать систему, которая описывается линейным разностным уравнением с постоянными коэффициентами, не зависящими от входного и выходного сигналов и от времени. Если непрерывный объект также является линейным и стационарным, то всю цифровую САР можно смодели-

ровать в виде разностного уравнения вида (1), но более высокого порядка.

Для анализа и синтеза линейных стационарных импульсных систем используют z -преобразование числовых последовательностей $\{e(k)\}$, которое определяется как степенной ряд следующего вида:

$$E(z) = \mathfrak{Z}[\{e(k)\}] = e(0) + e(1)z^{-1} + e(2)z^{-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} e(k)z^{-k}. \quad (2)$$

Последовательность $\{e(k)\}$ образуется из функции времени $e(t)$ путем взятия выборок каждые T секунд, то есть $\{e(k)\}$ понимается как $\{e(kT)\}$. Используя свойство о сдвиге на целое число [14], z -преобразование разностного уравнения (1) может быть записано в следующем виде:

$$M(z) + a_1 z^{-1} M(z) + \dots + a_n z^{-n} M(z) = b_0 E(z) + b_1 z^{-1} E(z) + \dots + b_n z^{-n} E(z) \quad (3)$$

или

$$M(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} E(z). \quad (4)$$

Так как в (4) $E(z)$ известно, то $m(k)$ может быть найдено в результате обратного z -преобразования этого выражения на основе разложения на простые дроби и использования таблицы z -преобразований.

Для того, чтобы определить передаточную функцию импульсной САР, необходимо рассмотреть импульсную систему, рис. 2, которая состоит из непрерывных элементов, единственным дискретным элементом которой является квантователь, для восстановления дискретного сигнала в непрерывном виде в этой системе используется экстраполятор.



Рис. 2. САР импульсного типа

В импульсной САР обычно для восстановления дискретного сигнала в непрерывном виде применяется экстраполятор (фиксатор) нулевого порядка (ФНП), на выходе которого в течение всего периода квантования сохраняется постоянное значение дискретного сигнала. Выходной сигнал ФНП можно записать в следующем виде:

$$\bar{e}(t) = e(0)[u(t) - u(t-T)] + e(T)[u(t-T) - u(t-2T)] + e(2T)[u(t-2T) - u(t-3T)] + \dots$$

Используя преобразование Лапласа, для сигнала $\bar{e}(t)$ можно получить его непрерывное изображение:

$$\bar{E}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \left[\sum_{n=0}^{\infty} e(nT) e^{-nTs} \right].$$

В этом выражении множитель $(1 - e^{-Ts}/s)$ не зависит от $e(t)$, поэтому его можно рассматривать как передаточную функцию. Операции квантования и фиксации представлены в виде схемы на рис. 3.

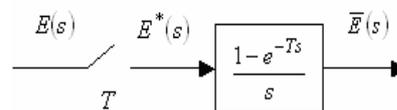


Рис. 3. Передаточная функция квантователя и ФНП

Преобразование со звездочкой определяет выходной сигнал идеального квантователя, изображение по Лапласу которого имеет вид:

$$E^*(s) = \sum_{n=0}^{\infty} e(nT) e^{-nTs}. \quad (5)$$

Преобразование со звездочкой, $E^*(s)$, и z -преобразование, $E(z)$, имеют сходство. Если последовательность $\{e(k)\}$ рассматривать как результат квантования функции времени $e(t)$ с периодом T секунд, то очевидно, что:

$$E^*(s) = E(z) \Big|_{z=e^{Ts}}.$$

Определим передаточную функцию разомкнутой системы импульсного типа, рис. 4.

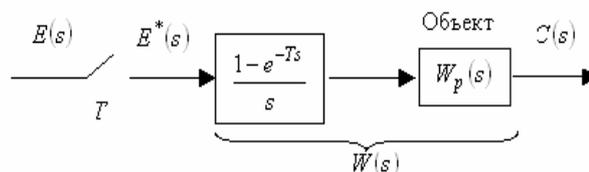


Рис. 4. Разомкнутая импульсная система

Общая передаточная функция объекта и экстраполятора нулевого порядка определяется следующим выражением:

$$W(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} W_p.$$

Передаточная функция разомкнутой системы, $C(s) = W(s)E^*(s)$, откуда:

$$C^*(s) = [W(s)E^*(s)]^* = E^*(s)W^*(s). \quad (6)$$

Если в этом уравнении заменить e^{Ts} на z , то получим импульсную передаточную функцию $C(z) = W(z)E(z)$, связывающую входной и выходной сигналы в моменты квантования.

ЦРУ и связанные с ним АЦП и ЦАП можно представить в виде структурной схемы, рис. 5.

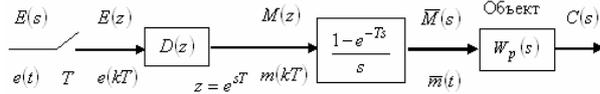


Рис. 5. Модель разомкнутой импульсной системы

Передаточная функция разомкнутой импульсной системы:

$$C(s) = W_p(s)\bar{M}(s) = W_p(s)\left[\frac{1-e^{-Ts}}{s}\right]M^*(s),$$

$$C(z) = \mathfrak{Z}\left[\frac{1-e^{-Ts}}{s}W_p(s)\right]M(z) = \mathfrak{Z}\left[\frac{1-e^{-Ts}}{s}W_p(s)\right]D(z)E(z) = W(z)D(z)E(z),$$

где $D(z)$ – передаточная функция цифрового регулятора.

Определим передаточную функцию замкнутой цифровой САР, рис. 6.

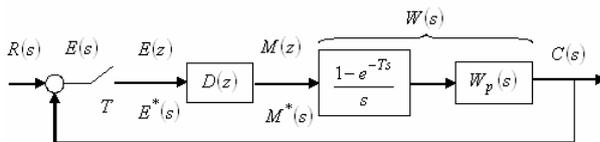


Рис. 6. Модель замкнутой одноконтурной импульсной системы

Замкнутая одноконтурная импульсная система описывается следующими уравнениями:

$$E(s) = R(s) - W(s)D^*(s)E^*(s),$$

$$C(s) = W(s)D^*(s)E^*(s). \quad (7)$$

Применим к $E(s)$ преобразование со звездочкой:

$$E^*(s) = \frac{R^*(s)}{1 + D^*(s)W^*(s)}.$$

Подставляя это выражение в (7) и применяя z -преобразование, получим:

$$C(z) = \frac{D(z)W(z)}{1 + D(z)W(z)}R(z).$$

Таким образом, передаточная функция замкнутой одноконтурной цифровой САР имеет следующий вид:

$$T(z) = \frac{D(z)W(z)}{1 + D(z)W(z)}. \quad (8)$$

Определим передаточную функцию цифрового ПИД-регулятора. Для непрерывного входного сигнала $e(t)$ выходной сигнал $m(t)$ аналогового ПИД-регулятора описывается следующим выражением:

$$m(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (9)$$

где K_p, K_I, K_D – постоянные коэффициенты регулятора.

В цифровом ПИД-регуляторе операции интегрирования и дифференцирования осуществляются численно.

В соответствии с численным интегрированием по методу Эйлера, можно записать:

$$m[(k+1)T] = m(kT) + Te[(k+1)T]. \quad (10)$$

Для численного дифференцирования используем следующую формулу:

$$m[(k+1)T] = \frac{e[(k+1)T] - e(kT)}{T}. \quad (11)$$

Используя (10) и (11), вместо выражения (9), можно записать разностное уравнение, реализующее цифровой ПИД-регулятор, в следующем виде:

$$m(k+1) = K_p e(k+1) + K_I [m(k) + Te(k+1)] + K_D \frac{e(k+1) - e(k)}{T}. \quad (12)$$

Применив z -преобразование к выражениям (10) и (11), в предположении нулевых начальных условий, на основании (12) получим выражение передаточной функции цифрового ПИД-регулятора в виде:

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K_p + K_I \frac{Tz}{z-1} + K_D \frac{z-1}{Tz}. \quad (13)$$

2. Стенд цифрового регулятора пневматической системы

Рассмотрим принципы разработки стенда САР с цифровым РУ (ЦРУ) для ПС самолета.

Сформулируем требования, которым должен удовлетворять стенд для функциональных испытаний и отработки параметров САР самолетной ПС с ЦРУ.

Стенд должен быть натурным – основные элементы САР, характеризующие ОР, ИМ, РО и режи-

мы работы ПС в максимальной степени должны соответствовать самолетным.

В состав стенда должны входить, рис. 7:

– источник сжатого воздуха (ИСВ) с краном-регулятором давления (КР), имитирующие самолетную систему подготовки воздуха;

– имитатор ОР (ИОР);

– система измерения РП, включающая датчик, коммуникационные каналы и устройство согласования (УСД);

– самолетный ИМ с РО и устройство согласования (УСИ);

– система контроля и регистрации параметров (СКРП) стенда с прототипом ЦРУ.

ИСВ (совместно с КР) должен обеспечивать значения параметров воздуха и переходные режимы, соответствующие работе самолетной системы подготовки воздуха (СПВ).

Имитатор ОР должен обеспечивать емкость и гидравлическое сопротивление трубопроводов ПС самолета, а также переходные режимы, соответствующие работе потребителей ПС самолета.

Точность измерения ДРП стенда должна быть не ниже точности измерения регулируемого параметра в ПС самолета. Временные характеристики системы измерения регулируемого параметра должны соответствовать самолетным.

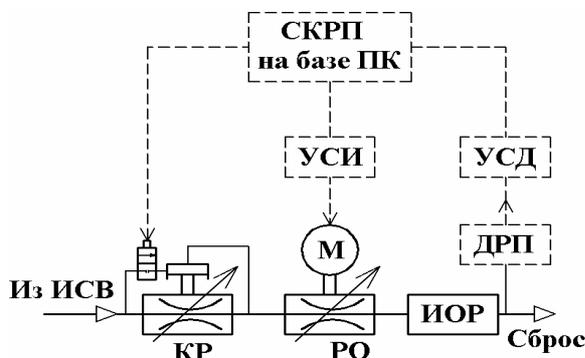


Рис. 7. Пневматическая схема стенда цифровой САР

СКРП должна обеспечивать:

– включение и индикацию питания стенда сжатым воздухом;

– задание значения регулируемого параметра;

– задание значений параметров РУ;

– задание режима работы и включение регулятора;

– индикацию изменения значений регулируемого параметра в процессе регулирования в реальном масштабе времени;

– оценку значений параметров качества процесса регулирования;

– формирование базы данных и сохранение значений параметров РУ и результатов измерений

значений регулируемого параметра в формирование базы данных и сохранение значений параметров РУ и результатов измерений значений регулируемого параметра в процессе регулирования.

ИСВ стенда поддерживает значения параметров воздуха, соответствующие значениям на фланце отбора от компрессора МДУ самолета. Заданное рабочее давление в стенде поддерживает КР, который при включении и в процессе регулирования имитирует переходные режимы работы самолетной СПВ.

Самолетный ИМ с РО на стенде позволяют установить диаметры подводящего трубопровода, узлы крепления и устройство согласования УСИ.

ОР имитируется трубопроводами, которые имеют емкость и гидравлическое сопротивление, соответствующие ПС самолета.

Система, контроля и регистрации параметров стенда реализована на базе ПК, рис. 8.

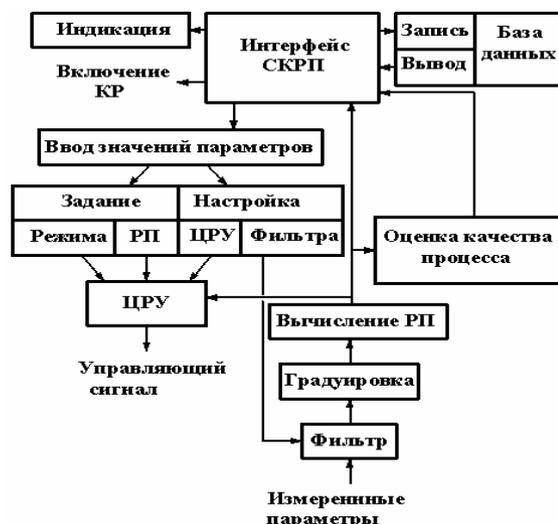


Рис. 8. Функциональная схема СКРП

Компьютерный интерфейс СКРП, разработанный для проведения испытаний регулятора параметров воздуха, отбираемого от ГТД с цифровым РУ представлен на рис. 9.

Разработанный интерфейс СКРП АРВП позволяет:

– осуществлять управление стендом – включать подачу сжатого воздуха в стенд за счет открытия КР; включать в работу регулятор; задавать режим работы регулятора – автоматический или ручной; задавать значение регулируемого параметра; подключать базу данных;

– контролировать режимы работы стенда и СКРП;

– настраивать параметры регулятора и коэффициенты цифрового фильтра;

– наблюдать процесс изменения значений регу-

лируемого параметра по времени при регулировании в графическом и табличном виде;
 – получать оценку значений параметров качества процесса регулирования;

– осуществлять запись в базу данных и извлекать из нее значения параметров регулятора и цифрового фильтра, результаты измерений значений регулируемого параметра в процессе регулирования.

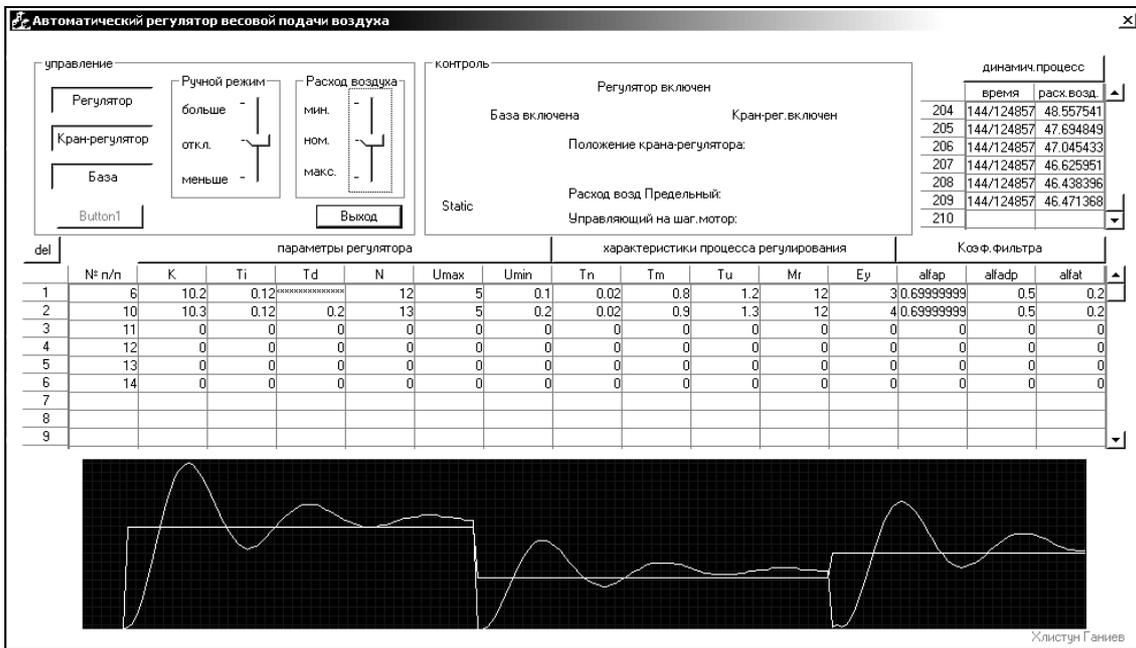


Рис. 9. Интерфейс системы контроля и регистрации параметров стенда

3. Моделирование динамики цифрового регулятора пневматической системы

Функциональная схема цифровой САР представлена на рис. 10. Объектом регулирования является участок трубопровода, через который проходит поток сжатого воздуха. Первичный преобразователь и аналоговый датчик обеспечивают измерение регулируемого параметра. ЦРУ и АЦП – реализованы на базе цифрового процессора, используются вычисле-

ния регулируемого параметра и формирования дискретного управляющего сигнала. ЭПП включает шаговый двигатель и усилительное устройство типа сопло-заслонка, и формирует величину пневматического управляющего сигнала для ИМ. Исполнительный механизм – пневмопривод возвратно-поступательного действия, выходным элементом которого является шток, перемещающий РО – дроссельную заслонку, осуществляющую регулирующее воздействие.

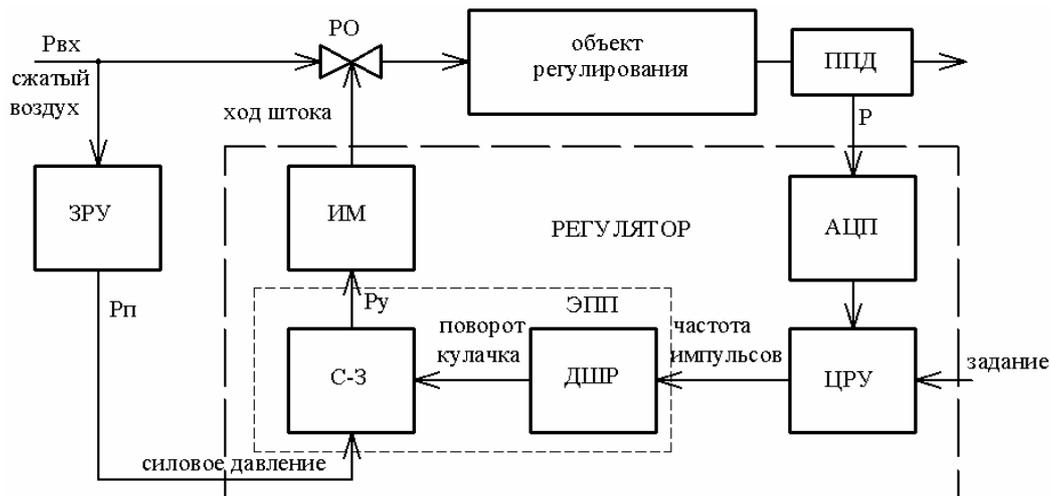


Рис. 10. Функциональная схема цифровой САР:

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ДШР – двигатель шаговый реверсивный; ЗРУ – запорно-регулирующее устройство; ППД – первичный преобразователь и датчик измеряемого параметра; С-3 – усилительное устройство типа сопло-заслонка; ЭПП – электропневматический преобразователь

В САР выделены следующие звенья:

- 1) пневматические звенья,
 - объект регулирования, переменная состояния – регулируемый параметр воздуха P ;
 - пневматическая камера ИМ, переменная состояния – управляющее давление P_y .

- 2) механические звенья,
 - заслонка с механической частью ИМ, переменная состояния – угол поворота заслонки α ;
 - электропневматический преобразователь, переменная состояния – угол поворота кулачка α_y .

- 3) дискретное звено,
 - цифровое регулирующее устройство, переменная состояния – частота управляющих импульсов, f . Уравнения переходных процессов пневматических и механические звеньев, и их передаточные функции были получены в работах [9, 11]. Пневматические звенья являются аperiodическими, а механические – колебательными звеньями.

В ЭПП на базе ДШР входной дискретный частотный сигнал преобразуется в поворот кулачка усилительного элемента типа “сопло-заслонка”. Преобразование частоты вращения в угол поворота описывается следующей зависимостью:

$$\alpha_s = \int_0^T \omega dt. \tag{14}$$

Дискретный аналог уравнения (13) для ЭПП с ДШР получим в соответствии с интегрированием по методу Эйлера (10):

$$\alpha[(k+1)T] = \alpha(kT) + T\omega[(k+1)T]. \tag{15}$$

Передаточную функцию электропневматического преобразователя получим в результате z-преобразования уравнения (14):

$$A(z) = \frac{Tz}{z-1} \Omega(z). \tag{16}$$

В ЦРУ входной сигнал ошибки измеренного параметра воздуха в ОР преобразуется в выходной дискретный управляющий частотный сигнал для ДШР. В ЦРУ реализуется ПИД-регулятор, дискретный аналог передаточной функции этого регулятора имеет вид (13). По передаточным функциям динамических звеньев разработана структурная схема цифровой САР, рис. 11.

По конструктивным данным регулятора расхода воздуха, отбираемого от компрессора МДУ самолета транспортной категории, построена модель в подсистеме графического моделирования MATLAB Simulink, рис. 12.

Представленная модель использована для исследования переходных процессов в цифровом регуляторе. Определены период квантования, $T = 0,01$ с, и коэффициенты ПИД-регулятора, обес-

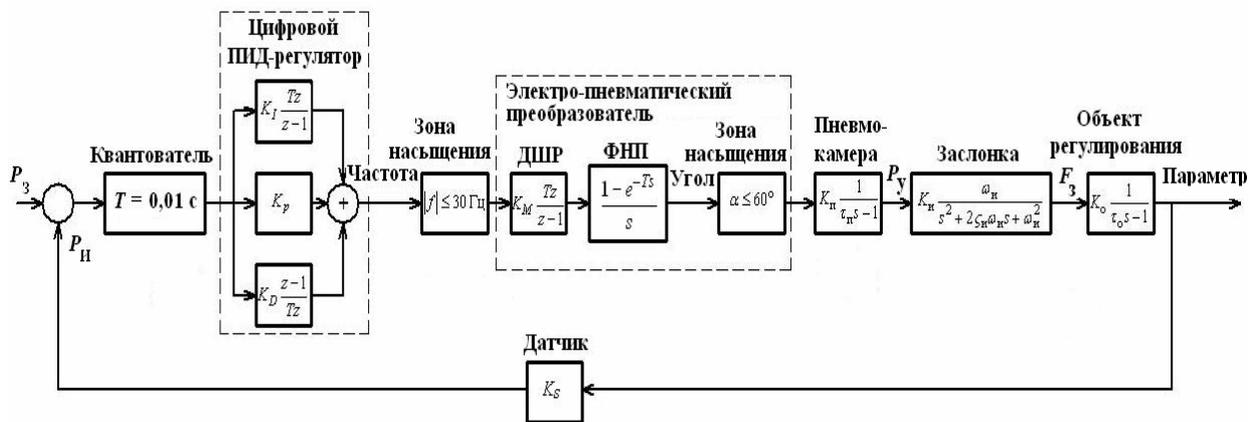


Рис. 11. Структурная схема цифровой САР с шаговым двигателем

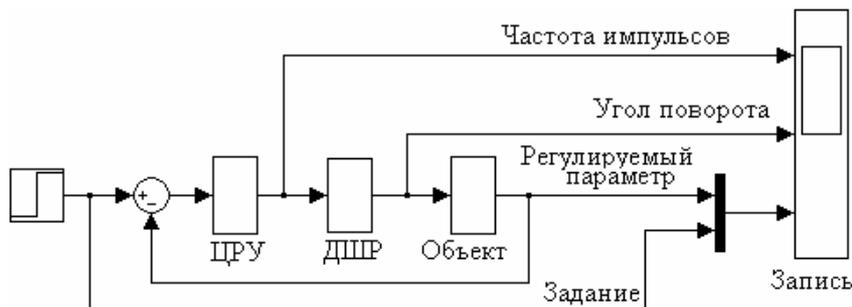
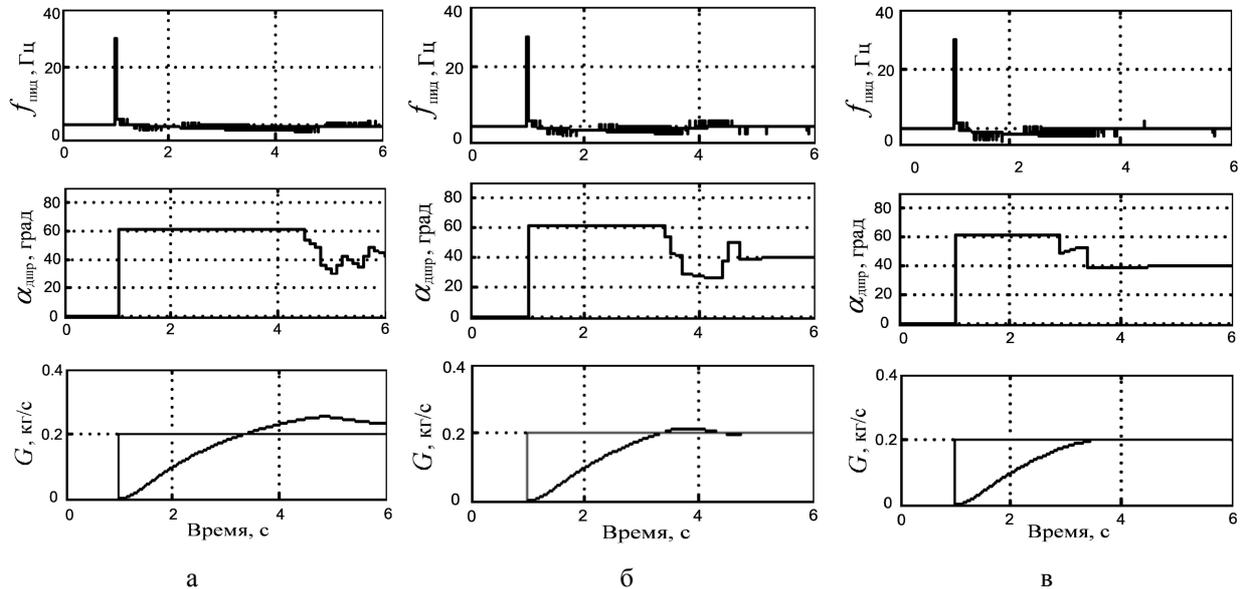


Рис. 12. Модель регулятора в Simulink

печаивающие устойчивость переходного процесса и допустимое его качество при ступенчатом задании регулируемого параметра, $K_p = 10$, $K_I = 0,05$, $K_D = 1,5 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$. Получены зависимости выходного сигнала ЦРУ, угла поворота выходного

вала ДШР, а также регулируемого параметра (расхода воздуха через систему) от времени в переходном процессе регулятора для различных значений коэффициента дифференцирующего звена, K_D , рис. 13.



$f_{\text{имп}}$ – частота импульсов на выходе ПИД-регулятора; $\alpha_{\text{авд}}$ – угол поворота ДШР;
G – регулируемый параметр (расход воздуха)

Рис. 13. Результаты моделирования регулятора в Simulink:

а – $K_D = 1,5 \cdot 10^3$; б – $K_D = 2 \cdot 10^3$; в – $K_D = 2,5 \cdot 10^3$

Заключение

1. Предлагается функциональный анализ цифрового регулятора параметров воздуха, отбираемого от компрессора ГТД, проводить на основе разностных моделей с использованием компьютерно-интегрированного моделирования в системе MATLAB.

2. Сформулированы требования к стенду для функциональных испытаний и отработки параметров САР с цифровым регулирующим устройством, разработаны пневматическая схема стенда и интерфейс системы контроля и регистрации параметров.

3. Рекомендуются полученные результаты использовать при разработке структуры и отработке параметров САР с цифровым регулирующим устройством для самолетных пневматических систем.

Литература

1. Егоров М.С. Герметическая кабина самолетов и их оборудование / М.С. Егоров, А.М. Гершкович // Тр. ЛИИ, №9. Изд-во бюро новой техники НКАП, 1945. – 129 с.

2. Петров Б.Н. Герметическая кабина как объект регулирования и подачи воздуха / Б.Н. Петров, Б.И. Якимович // Труды МАИ, 1947, вып. XI. – М.: Изд-во МАИ. – 24 с.

3. Голубев М.Д. Газовые регуляторы давления. Под ред. Г.И. Воронина / М.Д. Голубев. – М.: Машиностроение, 1964. – 152 с.

4. Кармугин Б.В. Совершенствование конструкций пневмоагрегатов летательных аппаратов / Б.В. Кармугин // Пром. гидравлика і пневматика. – 2004. – № 3(5). – С. 23-24.

5. Ратманский О.И. Пневматические регуляторы давления для воздушных систем самолетов / О.И. Ратманский, А.Д. Ласточкин, О.С. Бабий, В.В. Терентьев // Вибрации в технике и технологиях. – Вінниця, 2003. – №3(29). – С. 44-45.

6. Ратманский О.И. Регуляторы параметров воздушных систем самолетов / О.И. Ратманский, В.В. Терентьев, Г.В. Кудряшов // Пром. гидравлика і пневматика. – Вінниця, 2003. – № 3(5). – С. 33 -36.

7. Агаджанян С.Г. Пневматические элементы регуляторов / С.Г. Агаджанян, Б.Р. Барский, Е.П. Долгий. – М.: Машиностроение, 1979. – 111 с.

8. Хлестун А.И. Динамические условия рабочего процесса регулятора давления воздуха, отбираемого от двигателя самолета / А.И. Хлестун,

Ю.Н. Рыкунич // *Вестн. Нац. техн. ун-та Украины "Киевский политехнический институт"*, сер. "Машиностроение". – К., 2002. – Вып. 42, т. 2. – С. 30-33.

9. Хлисту А.И. Математическая модель рабочего процесса пневматического регулятора давления / А.И. Хлисту, Ю.Н. Рыкунич, О.И. Ратманский // *Пром. гидравлика и пневматика*. – Винница: 2003. – № 1. – С. 33-36.

10. Бочаров В.П. Определение характеристик демпфирования исполнительного пневмопривода сетевого регулятора воздушной системы самолета / В.П. Бочаров, А.И. Хлисту, Ю.Н. Рыкунич // *Автоматизация производственных процессов*. – К., 2004. – №2(19). – С. 153-158.

11. Хлисту А.И. Динамические характеристики регулятора давления пневматической системы

самолета / А.И. Хлисту // *Пром. гидравлика и пневматика*. – Винница, 2004. – № 1(3). – С. 70-75.

12. Хлисту А.И. Стенд цифрового регулятора пневматической системы самолета / А.И. Хлисту, О.И. Ратманский, А.З. Ганиев // *Пром. гидравлика и пневматика*. – Винница, 2004. – № 3(5). – С. 62-64.

13. Хлисту А.И. Анализ качества сетевых регуляторов пневматических систем транспортных самолетов на основе компьютерно-интегрированных технологий / Хлисту А.И. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр.* – X. : Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2010. – Вып. 46. – С. 146-157.

14. Franklin G.F. *Digital control of dynamic systems* / G.F. Franklin, J.D. Powell, M. Workman. – Delhi: Pearson Education, 2003. – 742 p.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры прикладной гидроаэромеханики и механотроники А.П. Губарев, Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев.

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯ, ЩО ВІДБИРАЄТЬСЯ ВІД КОМПРЕСОРА ГТД

О.І. Хлисту, В.П. Бочаров, О.З. Ганієв, Т.О. Терещенко

Наведено математичний опис цифрового регулятора параметрів повітря, що відбирається від компресора ГТД, який засновано на представленні динаміки цифрового регулюючого пристрою у вигляді різницевого рівняння і використанні z-перетворення для отримання передаточної функції регулятора. Сформульовані вимоги до стенду для функціональних випробувань і відпрацювання параметрів цифрового регулятора, наведені пневматичну схему стенду і інтерфейс системи контролю та реєстрації параметрів. Наведено результати функціонального аналізу цифрового регулятора пневматичної системи літака транспортної категорії, який проведено з використанням комп'ютерно-інтегрованого методу.

Ключові слова: цифровий регулятор, пневматична система літака, регулювання параметрів повітря, компресор ГТД.

FUNCTIONAL ANALYSIS OF GAS-TURBINE ENGINE BLEED AIR PARAMETERS DIGITAL CONTROLLER

O.I. Khlystun, V.P. Botcharov, O.Z. Haniyev, T.O. Tereshchenko

Mathematical description of gas-turbine engine bleed air parameters digital controller is presented. The controller's dynamics is represented in the form of the transfer functions. For this goal difference equations and z-transforms are used. The requirements to the functional tests bench of air parameters digital controller are formulated. The pneumatic diagram of the bench and interface of the monitoring and registration system are presented. The results of bleed air parameters digital controller functional analysis of transport category aircraft pneumatic system are presented, the computer-integrated techniques are used.

Key words: digital controller, aircraft pneumatic system, air parameters controlling, gas-turbine engine compressor.

Хлисту Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры гидрогазовых систем Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: airsys@ukr.net.

Бочаров Виктор Пантелеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидрогазовых систем Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: ggsp@nau.edu.ua.

Ганиев Александр Закариевич – канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Института геофизики НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: algan@ukr.net.

Терещенко Татьяна Александровна – инженер, инженер Ассоциации специалистов промышленной гидравлики и пневматики, Киев, Украина, e-mail: airsys@ukr.net.