

Анализ качества сетевых регуляторов пневматических систем транспортных самолетов на основе компьютерно-интегрированных технологий

Национальный авиационный университет

Разработан компьютерно-интегрированный метод расчета динамики авиационных пневматических регуляторов параметров воздуха, учитывающий нелинейные эффекты. Полученные данные по качеству сетевого пневматического регулятора давления показывают, что при одновременном повышении демпфирования исполнительного механизма и увеличении коэффициента усиления регулирующего устройства можно существенно уменьшить относительное перерегулирование и снизить ошибку регулирования.

Ключевые слова: пневматические сетевые регуляторы, авиационные пневматические системы.

Введение

Сетевые регуляторы пневматических систем (ПС) транспортных самолетов устанавливаются непосредственно в местах отбора сжатого воздуха от компрессоров маршевых ГТД в системах подготовки воздуха (СПВ). Они осуществляют включение и выключение отбора воздуха, служат для ограничения давления воздуха перед транспортировкой по трубопроводам к потребителям, обеспечивают работу ряда жизненно важных и наиболее энергоемких бортовых систем самолета (рис. 1).

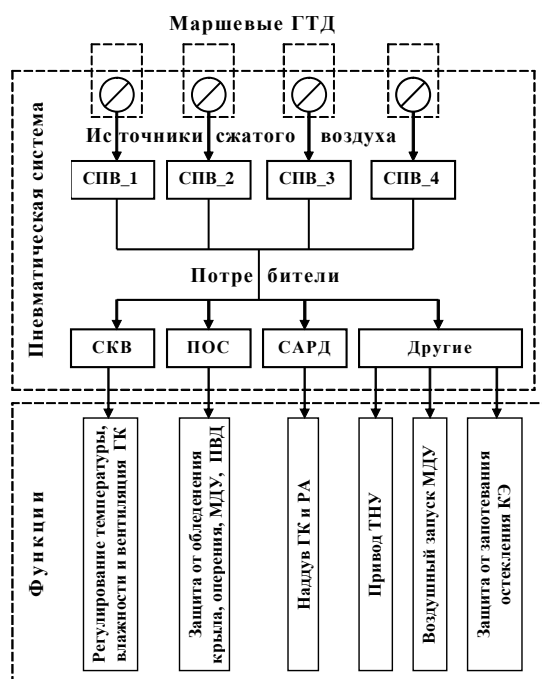


Рис. 1. Источники и потребители ПС транспортного самолета:
ГК – герметическая кабина; КЭ – кабина экипажа; МДУ – маршевая двигательная установка; ПОС – противообледенительная система; РА – радиоаппаратура; САРД – система автоматического регулирования давления воздуха; СКВ – система кондиционирования воздуха; ТНУ – турбонасосная установка

В современных авиационных ПС нашли широкое применение сетевые газовые (пневматические) регуляторы параметров воздуха (СПРПВ), использующие в качестве рабочего тела воздух, параметры которого регулируются. Пневматические регуляторы в наибольшей степени удовлетворяют таким требованиям, как надежность, пожаробезопасность, работоспособность в тяжелых условиях внешней среды (при высоких уровнях температуры, вибрации, ударных нагрузок), быстродействие, большая пропускная способность, малый вес и габаритные размеры, большой ресурс при достаточно высоких статических и динамических показателях качества процесса регулирования, энергонезависимость.

Регулируемые объекты современных авиационных сетевых регуляторов имеют ряд особенностей: большие расходы потребляемого воздуха при возможности изменения величин этих расходов в несколько раз; изменение значения регулируемого параметра в зависимости от высоты полета; изменение в широких пределах параметров регулируемого объекта; работа двух и более регуляторов на общий регулируемый объект. Параметры воздуха, создаваемые компрессором МДУ характеризуются значительной нестабильностью: при смене режима работы МДУ и высоты полета самолета давление может изменяться в несколько раз; в широких пределах меняется температура.

Современные международные и федеральные Авиационные правила (АП-25, JAR-25, FAR-25) относят пневматическую систему самолетов транспортной категории к системам, непосредственно влияющим на безопасность полетов, предъявляют повышенные требования к ее функциональным характеристикам и надежности. От качества регулирования параметров воздуха, используемого для питания таких систем, как СКВ, ПОС, САРД, во многом зависят надежность работы, функциональные характеристики и экономичность этих систем. Поэтому, для повышения качества процесса регулирования при проектировании сетевых регуляторов для пневматических систем транспортных самолетов целесообразно применять современные компьютерно-интегрированные технологии (КИТ).

Анализ исследований и публикаций

Вопросы проектирования и расчета пневматических систем для обеспечения высотных полетов самолетов возникли с началом широкого применения этих систем и их агрегатов [1, 2]. Теоретические основы расчета и проектирования авиационных сетевых пневматических регуляторов 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-регулирующей арматуры для авиационных пневматических систем, повышению их надежности за счет применения новых схемных и конструктивных решений при проектировании, методам испытаний и анализа ее эксплуатационных изменений посвящены работы [4 - 6]. Авторами работы [7] изложены принципы построения непрерывных, дискретных и непрерывно-дискретных пневматических элементов, предназначенных для автоматизации систем кондиционирования воздуха ЛА.

Работы [8 - 11] посвящены математическому моделированию рабочего процесса современных авиационных СПРПВ, экспериментальному исследованию

динамических характеристик их элементов, анализу показателей качества регулирования.

Анализ приведенных исследований и публикаций по вопросам проектирования, расчета и испытаний пневматических регуляторов и их элементов показывает, что в этих работах практически не нашли отражение методы КИТ проектирования и расчета рабочих процессов авиационных СПРПВ, анализа их динамических характеристик, качества регулирования.

Постановка проблемы

Остается важной научно-прикладной проблемой разработка и реализация методов компьютерно-интегрированных технологий проектирования авиационных сетевых пневматических регуляторов. Актуальность этой проблемы в теоретическом плане обусловлена многофакторностью и сложностью математического моделирования динамических процессов регулирования параметров воздуха при нестабильных внешних воздействиях и неопределенных параметрах элементов регулятора. Актуальность решения проблемы в практическом плане связана с отсутствием наработанных и апробированных методов КИТ проектирования авиационных СПРПВ, что, как показала практика проектирования, не исключает возможности ошибок, исправление которых требует много времени и больших материальных затрат.

Применение методов КИТ при проектировании СПРПВ позволяет решать следующий перечень задач:

1. Повысить точность математического описания проектируемых регуляторов (увеличить размерность и порядок дифференциальных уравнений, описывающих процесс регулирования, учесть нелинейность элементов, нестабильность параметров источников сжатого воздуха и регулируемого объекта) и, соответственно, улучшить их качество регулирования, расширить функции и возможности применения.

2. Автоматизировать вычислительный процесс, представление и интерпретацию результатов математического моделирования, упростить интерфейс взаимодействия с моделирующей системой и сделать его доступным для конструктора-разработчика регулятора, что позволит существенно сократить время проведения анализа качества регулятора при подборе оптимальных значений параметров его конструктивных элементов и структуры, а также упростить этот анализ.

3. Как результат решения задач 1 и 2 – учесть нестабильность источников сжатого воздуха и регулируемого объекта, неопределенность параметров элементов регулятора и, соответственно, обеспечить робастность авиационных сетевых пневматических регуляторов при проектировании.

4. Обеспечить возможность включения компьютерно-интегрированной модели регулятора в модель ПС в целом, а также использовать ее в стендовых испытаниях и при идентификации ее параметров по данным испытаний.

Основная часть

При разработке методов компьютерно-интегрированных технологий проектирования пневматических регуляторов будем учитывать общий методологический подход к проектированию авиационных ПС, которые относятся

к классу сложных технических систем, и поэтому в основе методологии их проектирования должен лежать системный подход [13]. Системный подход (СП) основан на понятии системы, которая рассматривается как конечное множество обладающих известными свойствами объектов, связанных между собой и определенным образом взаимодействующих для достижения поставленной цели.

Для реализации принципов СП, в проектировании авиационных СПРПВ центральное место должно занимать математическое моделирование. Кроме того, что в его основе должно лежать адекватное математическое описание динамики ряда физических процессов, реализующих регулирование и участвующих в нем, оно должно включать методы КИТ, обеспечивающие эффективные численные алгоритмы решения уравнений математической модели, интуитивно понятную для конструктора-разработчика среду, позволяющую достаточно быстро осуществлять интерактивное моделирование, представлять и интерпретировать результаты моделирования.

Инструментом КИТ который чаще всего выбирают в промышленных разработках и научных исследованиях для высокопроизводительного анализа и синтеза динамических систем, в том числе систем автоматического регулирования, является система компьютерного моделирования MATLAB. Эта система интегрирует вычисления, визуализацию, и программирование в простой для использования среде. MATLAB включает обширный набор вычислительных алгоритмов, охватывающий диапазон от элементарных функций, преобразований Лапласа и Фурье, до численного решения систем дифференциальных уравнений. Среда разработки предоставляет интуитивно понятный набор инструментов (в большинстве случаев в виде графического пользовательского интерфейса) которые помогают эффективно использовать средства MATLAB. Система MATLAB охватывает семейство специальных прикладных решений, которые позволяют осуществлять имитационное моделирование, исследовать как линейные, так и нелинейные системы автоматического управления, включать в модель неопределенные параметры.

Конструктивная схема СПРПВ

Сетевой пневматический регулятор конструктивно представляет собой набор взаимосвязанных механических и пневматических элементов, которые взаимодействуют между собой посредством создаваемых этими элементами сил для достижения поставленной цели функционирования регулятора – устойчивого автоматического поддержания на выходе заданного значения регулируемого параметра воздуха с требуемым качеством регулирования в заданных условиях внешних воздействий.

В процессе синтеза регулятора определяется набор элементов регулятора, между этими элементами устанавливаются связи, подбираются параметры элементов регулятора, которые обеспечивают достижение поставленной цели функционирования регулятора и выполнение задач, сформулированных в требованиях к регулятору.

Рассмотрим важный тип СПРПВ – сетевой пневматический регулятор давления, который является одним из обязательных элементов СПВ. В сетевом регуляторе давления, представленном на рис. 2, исполнительный механизм управляет регулирующим органом – заслонкой, в результате чего меняется проходное сечение питающего трубопровода таким образом, что давление в объекте регулирования, за заслонкой, поддерживается в соответствии с

заданием. Управляющее давление в пневматической камере ИМ p_y формируется в усилительном устройстве. Перемещение дросселирующего элемента усилительного устройства осуществляется чувствительным элементом РУ. Заданный уровень давления на выходе из регулятора формируется жесткостью пружины и сильфона регулирующего устройства и разностью регулируемого давления p_p и давления в сильфоне ε_w .

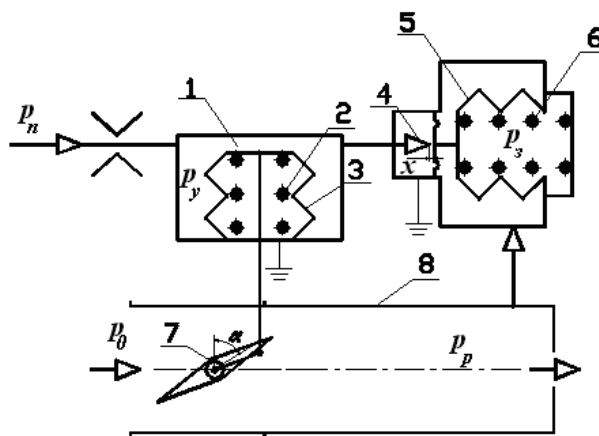


Рис. 2. Конструктивная схема сетевого регулятора давления:
1 – пневматическая камера исполнительного механизма (ИМ); 2 – пружина ИМ; 3 – сильфон ИМ; 4 – усилительное устройство; 5 – сильфон регулирующего устройства (РУ); 6 – пружина РУ; 7 – заслонка; 8 – регулируемый объект

Математическое описание динамики СПРПВ

Регулятор рассматривается как система звеньев с сосредоточенными параметрами. В регуляторе выделены пневматические и механические звенья, изменение параметров состояния которых определяет динамику переходных процессов. Для пневматических звеньев таким параметром состояния является давление, для механических – линейное или угловое перемещение. В рассматриваемом регуляторе к пневматическим звеньям относятся объект регулирования, переменной состояния которого есть регулируемое давление p_p , и пневматическая камера ИМ, переменной состояния которого есть управляющее давление p_y . К механическим звеньям относятся ЧЭ, переменной состояния которого – линейное перемещение x дросселирующего элемента усилительного устройства, и заслонка с механической частью ИМ, переменной состояния которой есть угол поворота заслонки α .

Математическое описание динамики пневматических звеньев может быть получено из уравнения состояния массы воздуха в звене с учетом уравнения сохранения этой массы типа термодинамического процесса в звене, а также соотношений для определения расхода воздуха, поступающего и истекающего из звена [9]. Динамика механических звеньев описывается уравнениями количества движения и момента количества движения с учетом действующих на звено сил или моментов сил [9, 10].

В общем виде динамика СПРПВ может быть представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$F(x'', x', x, p', p) = 0, \quad (1)$$

где F – функционал, связывающий функции параметров состояния звеньев регулятора;

x – вектор-функция параметров состояния механических звеньев, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x'' , x' – соответственно 2-я и 1-я производные по времени от x ;

p – вектор-функция параметров состояния пневматических звеньев, $p = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, p' – 1-я производная по времени от p .

Функционал F в общем случае определяет нелинейную связь функций параметров состояний и их производных. Он может иметь нелинейные функции параметров состояния, включать нелинейности типа "сухое трение", "насыщение" и другие, а также содержать зависящие от времени коэффициенты.

Важное значение для проектирования СПРПВ имеет использование аппарата теории линейных стационарных систем, который позволяет делать заключение об устойчивости или неустойчивости регулятора, проводить анализ качества процесса регулирования, оптимизировать конструктивные характеристики регулятора, обеспечивать его робастность. Линеаризация функциональных связей в уравнении (1) может быть обеспечена заменой нелинейных функций линейными членами их разложения в ряд Тейлора в окрестности точки равновесия, гармонической линеаризацией периодических нелинейностей. При определенных допущениях зависящие от времени коэффициенты в соотношении (1) могут быть приняты как стационарные.

Элементы сетевого пневматического регулятора взаимодействуют между собой таким образом, что выход механического звена является входом пневматического, и наоборот. Так, перемещение механического звена трансформируется в изменение площади проходного сечения дросселирующего устройства и, соответственно, в изменение расхода воздуха, проходящего через пневматическую емкость, что приводит к изменению параметра состояния пневматического звена – давления. В свою очередь, изменение давления в пневматическом звене, воздействуя на ЧЭ (мембрану, сильфон) приводит к нарушению баланса сил, действующих на механическое звено, и, в итоге, к изменению его параметра состояния – перемещения.

В результате линеаризации функционал (1) может быть заменен парой линейных функционалов со стационарными коэффициентами, которые определяют динамику механических и пневматических звеньев регулятора вида

$$\left. \begin{aligned} x'' + 2\mathcal{J}\mathcal{C}x' + \mathcal{U}_n^2 x &= K_x \mathcal{U}_n^2 p \\ \phi' + p &= K_p x \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где \mathcal{J} , \mathcal{U}_n , K_x – векторы, соответственно, безразмерных коэффициентов затухания (БКЗ), собственных частот колебаний и коэффициентов усиления (КУ) механических звеньев;

ϕ , K_p – векторы, соответственно, постоянных времени и КУ пневматических звеньев.

Значения коэффициентов в модели (2) определяются:

– конструктивными характеристиками элементов регулятора (массой подвижных частей механических звеньев, жесткостью упругих элементов,

площадью чувствительных элементов, а также площадью питающих и сбросных отверстий рабочего воздуха, объемом пневматических камер);

- физическими свойствами воздуха;
- характеристиками внешних условий и воздействий (уровнем и динамикой изменения параметров питающего воздуха);
- демпфирующими силами и их характеристиками (силами трения в элементах механических звеньев, аэродинамическими силами и моментами сопротивления).

От величины и соотношений значений коэффициентов модели (2) зависят устойчивость или неустойчивость решения ее уравнений, вид переходного процесса.

В работе [10] для регулятора типа, представленного на рис. 2, по его конструктивным характеристикам, внешним условиям, заданным характеристикам демпфирующих сил представлена линейная модель регулятора; с использованием системы MATLAB получены передаточные функции его звеньев, определено положение полюсов системы, построен корневой годограф для коэффициента усиления регулятора, получены его временные и частотные характеристики. Определен диапазон значений коэффициента усиления, в котором процесс регулирования является устойчивым, для этого диапазона определены показатели качества регулирования, запасы устойчивости, полоса пропускания и частота среза. Показано также, что изменение коэффициента усиления корректирующего устройства, величина которого определяется соотношением площади чувствительного элемента и жесткости задающей пружины, существенно влияет на показатели качества и запасы устойчивости регулятора.

Моделирование переходных процессов в СПРПВ

По конструктивными данным сетевого пневматического регулятора давления (рис. 2) получено математическое описание элементов регулятора, построена модель регулятора в Simulink (рис. 3) результаты моделирования использованы для оценки качества регулятора.

Передаточная функция мембраны ЧЭ

$$W_{чэ} = K_p \frac{401,4^2}{s^2 + 2\zeta_{чэ} \cdot 401,4s + 401,4^2},$$

где K_p – коэффициент усиления звена;

s – оператор дифференцирования в преобразовании Лапласа;

$\zeta_{чэ}$ – БКЗ мембраны чувствительного элемента.

Давление в пневмо-механическом преобразователе

$$p_n = \begin{cases} \min\left(\frac{31,8}{x}, 1,8 \cdot 10^5\right), & x > 0 \\ 1,8 \cdot 10^5, & x \leq 0 \end{cases}$$

где x – перемещение мембраны чувствительного элемента.

Уравнение динамики давления в пневмокамере ИМ

$$\frac{dp_y}{d\tau} = 3,98 \cdot \text{sign}(p_n - p_y) \cdot \sqrt{\min(p_n, p_y) \cdot |p_n - p_y|},$$

где τ – время.

Передаточная функция ИМ:

$$W_{им} = K_{им} \frac{12,65^2}{s^2 + 2\zeta_{им} \cdot 12,65s + 12,65^2},$$

где $K_{им}$ – коэффициент усиления звена;

$\zeta_{им}$ – БКЗ мембраны исполнительного механизма.

Функция связи площади проходного сечения заслонки и угла ее открытия:

$$\mu F_3 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1 - \cos[0,01745 \cdot (\alpha + 15^\circ)]}{\cos(0,01745 \cdot 15^\circ)}, \alpha \leq 60^\circ,$$

где α – угол открытия заслонки.

Уравнение динамики давления в объекте регулирования:

$$\frac{dp_p}{d\tau} = \mu F_3 \cdot \begin{cases} 2,62 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{p_p \cdot (p_0 - p_p)}, p_0/p_p \leq 1,89 \\ 1,29 \cdot 10^4 \cdot p_0, p_0/p_p > 1,89 \end{cases} - 18,8 \cdot p_p,$$

где p_p – регулируемое давление;

p_0 – давление на входе в регулятор.

Уравнение динамики давления в пневмокамере ЧЭ:

$$\frac{dp_{pu}}{d\tau} = 92,7 \cdot \text{sign}(p_p - p_{pu}) \cdot \sqrt{\min(p_{pu}, p_p) \cdot |p_p - p_{pu}|}.$$

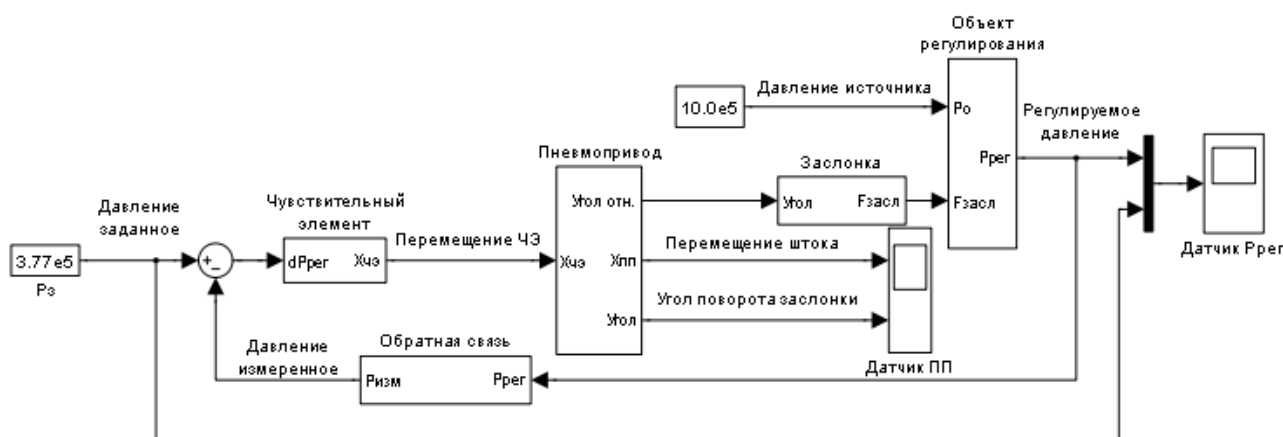


Рис. 3. Модель регулятора в Simulink

Представленная модель использована для исследования переходных процессов в регуляторе. Определены характер перемещения чувствительного

элемента регулирующего устройства и изменение угла поворота заслонки исполнительного механизма (рис. 4). Получены зависимости регулируемого давления от времени в переходном процессе регулятора для различных значений коэффициента усиления регулятора K_p и БКЗ исполнительного механизма $\zeta_{им}$ в приемлемых пределах значений конструктивных параметров (рис. 5).

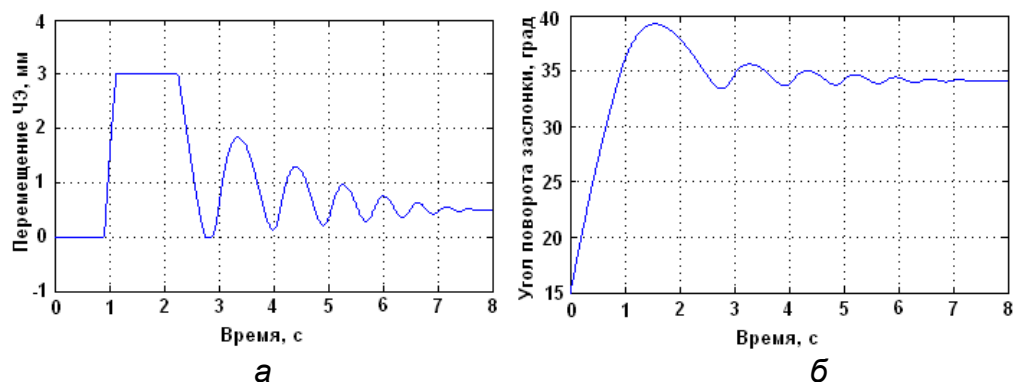


Рис. 4. Результаты моделирования переходных процессов чувствительного элемента РУ (а) и заслонки ИМ (б)

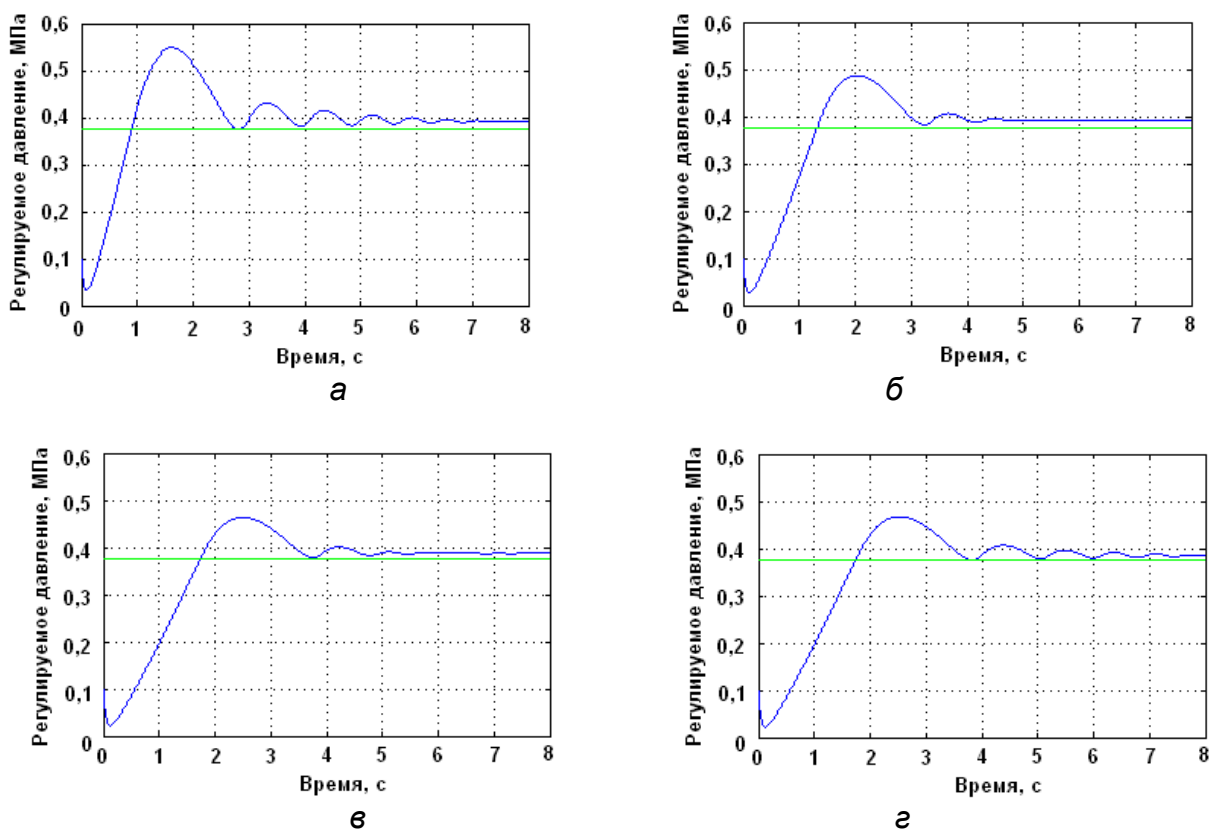


Рис. 5. Результаты моделирования:

- а – $\bar{K}_p = 1,0$, $\bar{\zeta}_{им} = 1$; б – $\bar{K}_p = 1,0$, $\bar{\zeta}_{им} = 1,5$; в – $\bar{K}_p = 1,5$, $\bar{\zeta}_{им} = 2$;
 г – $\bar{K}_p = 2,0$, $\bar{\zeta}_{им} = 2,0$

Оценивались показатели качества процесса регулирования.
 Максимум перерегулирования

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{p\max} - P_{p\infty}}{P_{p\infty}} \cdot 100\% ,$$

где $P_{p\max}$, $P_{p\infty}$ – значения давления на выходе регулятора, соответственно, максимальное и установившееся.

Установившаяся ошибка:

$$\varepsilon_{\infty} = \left| p_{p\infty} - p_3 \right| / p_3 \cdot 100\% ,$$

где p_3 – заданное давление на выходе регулятора.

Время регулирования t_p определялось по моменту времени, после которого регулируемое давление остается в пределах значений $p_p = P_{p\infty} \pm 0,03 P_{p\infty}$.

Быстродействие регулятора t_r оценивалось по времени достижения $p_{p\max}$.

По полученным графикам переходных процессов определены значения показателей качества регулятора давления, показанных в таблице.

Показатели качества регулятора давления, определенные по данным моделирования

№ п.п.	σ , %	ε , %	t_p , с	t_r , с	\bar{K}_p	$\bar{\zeta}_{\text{ум}}$
1	48,5	3,45	5,3	1,6	1,0	1,0
2	30,0	4,0	3,8	2,0	1,0	1,5
3	22,8	2,92	4,3	2,5	1,5	2,0
4	23,9	2,12	4,7	2,5	2,0	2,0

Обсуждение полученных результатов

Разработку современных методов компьютерно-интегрированных технологий проектирования сетевых регуляторов авиационных пневматических систем целесообразно вести на основе системы компьютерного моделирования MATLAB. Эта система включает специализированные подсистемы, позволяющие осуществлять имитационное моделирование, исследовать как линейные, так и нелинейные системы автоматического управления, включать в модель неопределенные параметры, обеспечивать робастность проектируемых систем. На основе математического описания элементов пневматического регулятора давления в подсистеме графического моделирования Simulink, которая относится к MATLAB, разработан компьютерно-интегрированный метод расчета динамики пневматического регулятора давления. Данный метод учитывает нелинейные элементы регулятора и позволяет проводить анализ качества процесса регулирования.

Полученные данные по качеству сетевого регулятора давления (см. и таблицу) рис. 5 показывают, что при одновременном повышении демпфирования исполнительного механизма регулятора и увеличении коэффициента усиления регулирующего устройства можно существенно уменьшить относительное перерегулирование (в 2 раза) и снизить ошибку регулирования (около 40%).

Выводы

1. Применение системного подхода к проектированию пневматических систем транспортных самолетов требует разработки современных методов компьютерно-интегрированных технологий расчета и анализа качества сетевых пневматических регуляторов параметров воздуха.

2. В соответствии с математическим описанием авиационного сетевого пневматического регулятора давления, который представлен в виде системы пневматических и механических звеньев с сосредоточенными параметрами с учетом их нелинейностей, в работе получена компьютерно-интегрированная модель регулятора, позволяющая исследовать динамику и качество регулятора.

3. Полученные оценки качества процесса регулирования показывают, что представленная модель регулятора может быть использована для оптимизации качества его переходного процесса за счет подбора необходимых значений параметров конструктивных элементов регулятора.

4. Использование компьютерно-интегрированных моделей авиационных сетевых пневматических регуляторов параметров воздуха, аналогичных представленной модели регулятора давления, при их проектировании позволяет существенно повысить качество регуляторов в условиях неопределенности параметров звеньев регулятора.

Список литературы

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 // Тр. МАИ. - М.: Изд-во МАИ. – 1947. – Вып. XI.– 24 с.
3. Голубев М.Д. Газовые регуляторы давления / М.Д. Голубев /под ред. Г.И. Воронина. – М.: Машиностроение, 1964. - 152 с.
4. Кармугин Б.В. Совершенствование конструкций пневмоагрегатов летательных аппаратов/ Б.В. Кармугин // Пром. гідравліка і пневматика. – № 3(5). Вінниця, 2004. – 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. – №3(29). – Вінниця, 2003. – С. 44 – 45.
6. Регуляторы параметров воздушных систем самолетов / О.И. Ратманский, В.В. Терентьев, Г.В. Кудряшов // Пром. гідравліка і пневматика. – № 3(5). – Вінниця, 2003 – 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. Бочаров В.П. Определение характеристик демпфирования исполнительного пневмопривода сетевого регулятора воздушной системы самолета / В.П. Бочаров, А.И. Хлисту́н, Ю.Н. Рыкуни́ч // Автоматизация производственных процессов.– К.; 2004. – №2(19). – С.153–158.

9. Хлисту́н А.И. Математическая модель рабочего процесса пневматического регулятора давления / А.И. Хлисту́н, Ю.Н. Рыкуни́ч, О.И. Ратманский // Пром. гідравліка і пневматикаю. – Вінниця, 2003. – № 1.– С. 33 -36.

10. Хлисту́н А.И. Динамические характеристики регулятора давления пневматической системы самолета / А.И. Хлисту́н // Пром. гідравліка і пневматика, – Вінниця, 2004. – № 1(3).– С. 70 - 75.

11. Хлисту́н. Экспериментальное исследование динамических характеристик исполнительного пневмопривода сетевого регулятора воздушной системы самолета / А.И. Хлисту́н, В.П. Бочаров, В.Н. Кузнецов и др. // Пром. гідравліка і пневматика. Вінниця, 2006. – № 1(11), – С. 89–93.

12. Хлисту́н А.И. Проблемы и методы проектирования авиационных систем кондиционирования воздуха / А.И. Хлисту́н, Ю.Н. Рыкуни́ч // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28. – №1. – С. 52 – 60.

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

Поступила в редакцию

Аналіз якості мережних регуляторів пневматичних систем транспортних літаків на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій

Розроблено комп'ютерно-інтегрований метод розрахунку динаміки авіаційних пневматичних регуляторів параметрів повітря, який враховує нелінійні ефекти. Отримані дані щодо якості мережного пневматичного регулятора тиску показують, що при одночасному підвищенні демпфірування виконавчого механізму і збільшенні коефіцієнта посилення регулюючого пристрою можна суттєво знизити відносне перерегулювання і, а також похибку регулювання.

Ключові слова: пневматичні мережні регулятори, авіаційні пневматичні системи.

Analysis of transport aircraft pneumatic system control valves quality on the base of computer-integrated technique

There has been developed CPU-integrated method of aeronautical pneumatic control valves dynamics calculation, which takes into the account nonlinear effects. Data has been obtained concerning quality of pressure pneumatic control valve shows that with simultaneous increasing of final control element dumping and increasing of control element gain it is possible to decrease relative excessive correction and error of control.

Keywords: pneumatic control valves, aeronautical pneumatic systems.