

§ 5 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Чернуха В.Н., Кастерский С.М., Апрельский Е.Н., Замятин В.Г., Куренков А.С. —■

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ В КАБИНЕ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Аннотация: Авторы подробно рассматривают пневмомеханический регулятор давления, имеющий существенное значение для бортовых систем кислородного питания воздушных судов, в интересах построения математической модели регулятора. Предметом исследования является построение математической модели пневмомеханического регулятора давления с учетом факторов, оказывающих существенное влияние на жизнедеятельность и работоспособность экипажа воздушного судна. Это обеспечило построение адекватных математических моделей, описывающих функционирование пневмомеханического регулятора давления в кабине воздушных судов, имеющих существенное значение для обеспечения безопасности в высотных полетах. Математическое моделирование регулятора давления с учетом факторов, оказывающих существенное влияние на жизнедеятельность и работоспособность экипажа воздушного судна: факторы, характеризующие атмосферное пространство как среду обитания для экипажа, факторы, связанные с динамикой полета, факторы, связанные с различного рода аварийными ситуациями, при которых дальнейший штатный полет становится невозможным. Исследование построенной математической модели позволило авторам выявить, что: - сухое трение основного клапана существенно ухудшает динамику регулятора, но практически не влияет на его статическую ошибку; - сухое трение управляющего клапана существенно увеличивает статическую ошибку регулятора, но практически не влияет на динамику регулятора; - наличие автоколебаний малой амплитуды и высокой частоты наряду с устранением зоны нечувствительности регулятора меняет структуру сухого трения, устраняя сухое трение покоя и др. Полученные результаты имеют существенное значение для проектирования систем обеспечения жизнедеятельности воздушных судов. **Ключевые слова:** система обеспечения жизнедеятельности, высотные полеты, авиационная кибернетика, пневмомеханический регулятор, регулятор давления, модель сухого трения, моделирование пневмомеханического регулятора, вычислительный эксперимент, переходные функции, система кислородного питания

Системы кислородного питания экипажей воздушных судов (ВС) предназначены для поддержания должной величины парциального давления кислорода во вдыхаемом воздухе, когда парциальное давление кислорода в окружающем воздухе становится ниже нормального. Их функционирование сводится к повышению процентного содержания и избыточного давления кислорода в герметизированной кабине воздушного судна в зависимости от высоты [1-10].

Для поддержания заданного закона изменения давления воздуха в кабине применяют регуляторы давления. Регулятор (рис. 1) понижает подводимое давление P_1 газа до заданного давления P_2 на выходе и стабилизирует его при изменении подводимого давления и потребляемого расхода газа G_3 . В корпусе регулятора установлены основной (ОК) и управляющий (УК) клапаны и дюза. Чувствительный элемент (ЧЭ), соединенный штоком с основным клапаном, разделяет управляющую полость регулятора на две: верхнюю A , присоединенную к полости редуцированного давления (P_2, V_2 ; рис. 1), и нижнюю B – пневматическую пружину.

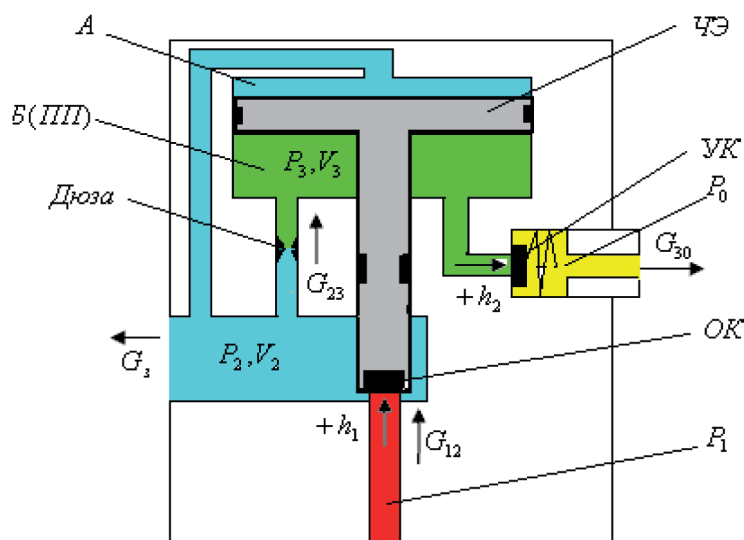


Рис. 1. Схема регулятора.

Полость B с дюзой на входе и управляющим клапаном на выходе, играет роль пневматической пружины (ПП). Номинальное давление на выходе задается установочным усилием пружины управляющего клапана.

Математическая модель регулятора включает два уравнения первого порядка для давлений P_2, P_3 (рис. 1), получаемых из уравнений состояния газа в соответствующих полостях регулятора и уравнений расхода газа через соответствующие дросселирующие отверстия. Движение каждого клапана (ОК и УК) определяется вторым законом Ньютона. Таким образом, моделируемая система представляется системой дифференциальных уравнений шестого порядка.

Типовые математические модели трения

Система кислородного питания в известной степени представляет собой цепь пневмомеханических газовых регуляторов и клапанных узлов. Характеристики пневмомеханического регулятора давления существенно зависят от сил трения в подвижных сочленениях элементов регулятора [1, 11–14]. Сила трения определяется величиной нормального давления между трущимися поверхностями, их геометрическими размерами и точностью обработки, скоростью относительного движения трущихся поверхностей, температурой и давлением в соответствующих полостях и рядом других параметров. Математическая модель трения должна обеспечивать возможность правильного воспроизведения известных основных явлений, возникающих при трении. В частности: существование «застоя» при движении с места; возможность появления релаксационных колебаний [15–19].

Обычно силу трения F_t в уравнении движения представляют в виде суммы двух сил: силы сухого трения F_{t1} , часто принимаемой не зависящей от величины относительной скорости v подвижных элементов и силы вязкого трения F_{t2} , пропорциональной этой скорости. Известные [11–15] модели сухого трения включают сухое трение покоя и сухое трение движения.

Параметром сухого трения покоя является сила трения покоя F_{tp} – это сила сопротивления движению клапана в момент, когда он трогается с места после останова, а параметром трения движения – сила трения движения F_{td} , которая часто представляется идеальной релейной характеристикой и имеет место, если скорость движения не равна нулю. Здесь величины F_{tp} , F_{td} – положительные.

Пусть $v = \frac{dh}{dt}$ – скорость движения клапана.

На основе анализа множества известных моделей сухого трения в [1] принята следующая обобщенная модель сухого трения подвижного поршня (ЧЭ) регулятора:

$$F_t = \begin{cases} F_{td}(P, T, v) \operatorname{sign}(v), & \text{при } v \neq 0; \\ F_{tp}(P, T) \operatorname{sign}(F_\Sigma), & \text{при } v = 0 \text{ и } |F_\Sigma| > F_{tp}; \\ F_\Sigma, & \text{при } v = 0 \text{ и } |F_\Sigma| \leq F_{tp}. \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{td}(P, T, v)$ – сила трения движения; $F_{tp}(P, T)$ – сила трения покоя; F_Σ – сумма сил, действующих на поршень, за исключением силы трения F_t . Применительно к рассматриваемой задаче F_{tp} , F_{td} – параметры сухого трения, величины положительные. Знаки сил учитываются в уравнении движения подвижного элемента. Принято, что знак (sign) определяется выражением

$$\operatorname{sign}(z) = \begin{cases} 1, & \text{при } z > 0; \\ -1, & \text{при } z < 0; \\ 0, & \text{при } z = 0. \end{cases}$$

Распространение получила модель трения с учетом эффекта Штрибека, когда сила

сухого трения как функция скорости поршня v определяется выражением

$$F_{t1}(v) = [F_{td} + (F_{tp} - F_{td})e^{-\frac{v}{v_s}}] \text{sign}(v), \quad (2)$$

Экспонентой сглаживается переход от силы трения покоя F_{tp} к силе трения движения F_{td} . Задаваемая величина v_s , так называемая скорость Штрибека, определяет скорость перехода. Тогда сила трения в функции скорости движения равна

$$F_t(v) = F_{t1}(v) + F_{t2}(v), \quad (3)$$

где $F_{t2}(v) = k_t \cdot v$ – сила вязкого трения, k_t – коэффициент вязкого трения.

Графики сил приведены на рис. 2.

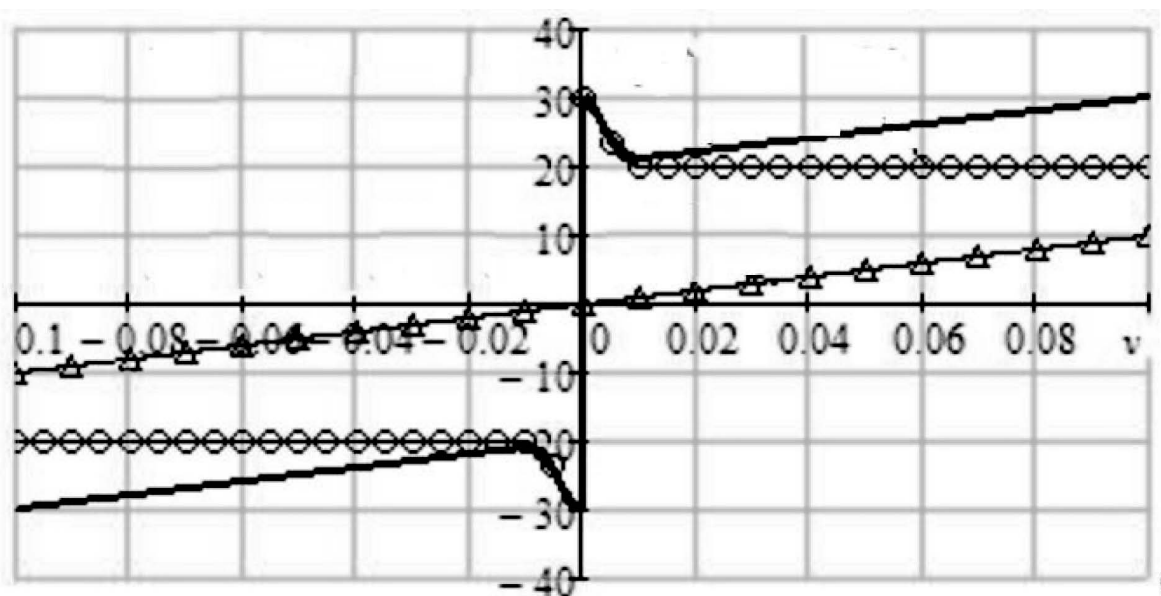


Рис. 2. Модель трения с учетом эффекта Штрибека (сплошная полужирная линия – $F_t(v)$, линия с кругами – $F_{t1}(v)$, линия с треугольниками – $F_{t2}(v)$).

Сложность модели обусловлена громоздкими выражениями, учитывающими зависимость сил трения покоя и трения движения от давления и температуры в полости, относительной скорости подвижных элементов, времени «застоя», параметров уплотнений и др. Причем, любая модель, в конечном счете, базируется на тех или иных исходных эмпирических данных [16–26].

Принята сравнительно простая модель, представленная на рис. 2. Учитывая, что любая модель базируется на эмпирических данных, предлагается параметры сухого трения F_{tp} , F_{td} и коэффициент вязкого трения k_t определять эмпирическим путем. Далее полагаем, что эти величины известны.

Исследование влияния сухого трения на статику и динамику регулятора давления

В численных экспериментах, посвященных исследованию влияния сухого трения, приняты размеры клапанов (ОК и УК, рис.1) исключающие появление автоколебаний (АК) при отсутствии сухого трения. Одновременно обеспечивается минимум времени регулирования (сотые доли секунды). Это важно, когда переходные функции вычисляются с очень малым шагом интегрирования ($h = 2 \cdot 10^{-6}$ с). Вычисляются переходные функции – реакции элементов и регулируемого давления на ступенчатое изменение расхода газа потребителем, равное 400 л/мин. Учитывается эффект Штрибека (рис. 2).

На рис. 4 приведены переходные функции положения $h_1(t)$, скорости движения $v(t)$ и силы сухого трения $F_{t1}(t)$ основного клапана: $h_1(t) = h_1 \cdot 10^{-4}$, м; $v(t) = v \cdot 10^{-3}$, м/с; $F_{t1}(t)$, Н. Параметры сухого трения равны: $F1_p = 15H$, $F2_p = 3H$ – силы трения покоя ОК и УК; $F2_d = 2H$, $F2_d = 2H$ – силы трения движения ОК и УК. Рисунки 3а, 3б, 3в отличаются только масштабами.

На рис. 5 приведены переходные функции регулируемого давления $P_2(t)$: $P_2(t) = P_2 \cdot 10^5$ Па. В начальные моменты времени ($t \in (0; 0,02)$ с) все переходные функции имеют колебательный резко затухающий характер. Поэтому дальнейшие рассуждения о характере переходного процесса к начальному участку не относятся. Рис. 4а, 4б иллюстрируют влияние на характеристики регулятора сил сухого трения ОК (а – характер переходного процесса колебательный и б – характер в «установившемся» режиме автоколебательный).

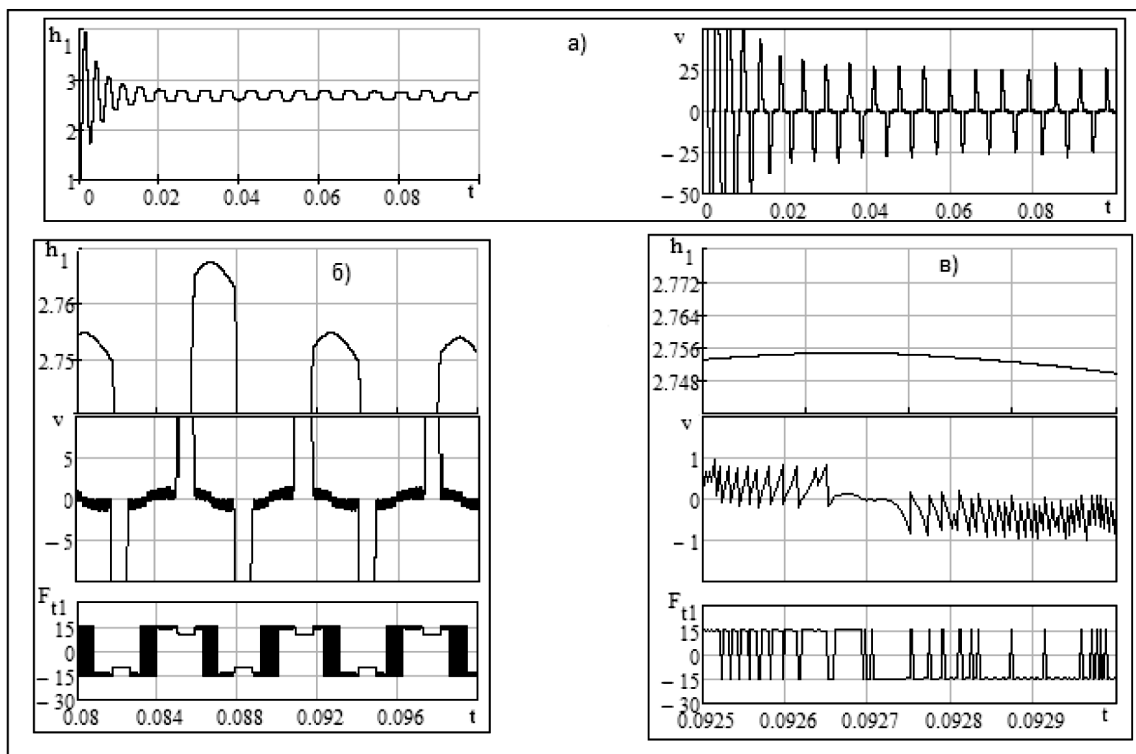
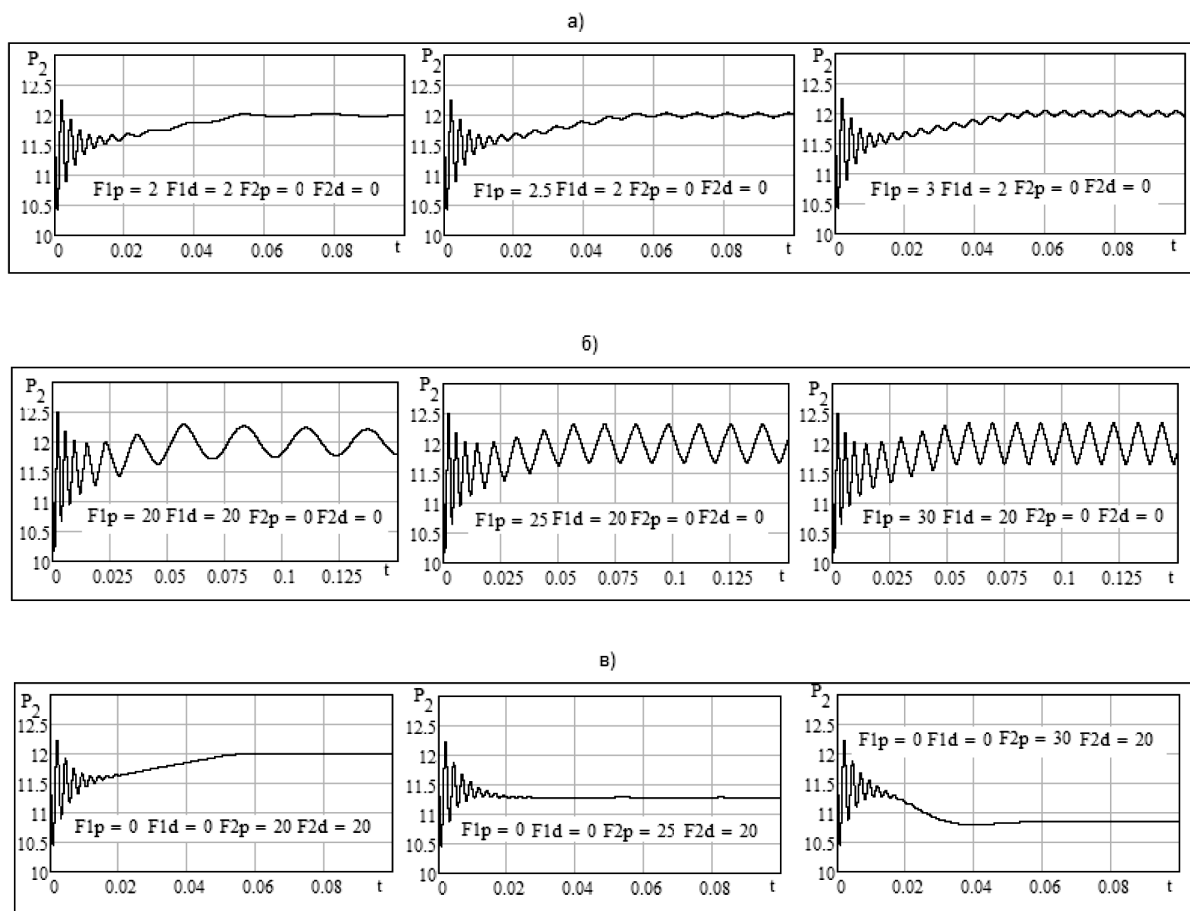


Рис. 3. Фрагменты переходных функций и сухого трения ОК (а, б, в - для различных масштабов по координатным осям).

Динамика процесса существенно определяется как величиной сил трения покоя $F1_p$ и трения движения $F1_d$, так и их отношением $F1_p/F1_d$:

1. из сравнения рис. 4а с рис. 4б следует, что амплитуда колебаний при одном и том же отношении $F1_p/F1_d$ увеличивается в несколько раз (≈ 6) при увеличении $F1_d$ от 2Н до 20Н;
2. частота колебаний при этом практически не изменяется;
3. сухое трение ОК практически не влияет на статическую ошибку регулятора: «установившееся» значение давления в среднем равно задаваемому номинальному ($12 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

Аналогично рис. 4в иллюстрирует влияние сухого трения УК. Динамика переходного процесса при изменении сил сухого трения УК практически не изменяется: переходный процесс не подвержен колебаниям. Однако статическая ошибка ΔP_2 весьма велика и сильно зависит от отношения $F2_p/F2_d$: так $\Delta P_2 \approx 0$, если $F2_p = 20\text{Н}$, $F2_d = 20\text{Н}$; $\Delta P_2 \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, если $F2_p = 30\text{Н}$, $F2_d = 20\text{Н}$. Аналогичные выводы можно сделать, если учтены силы сухого трения обоих клапанов (рис. 4г).



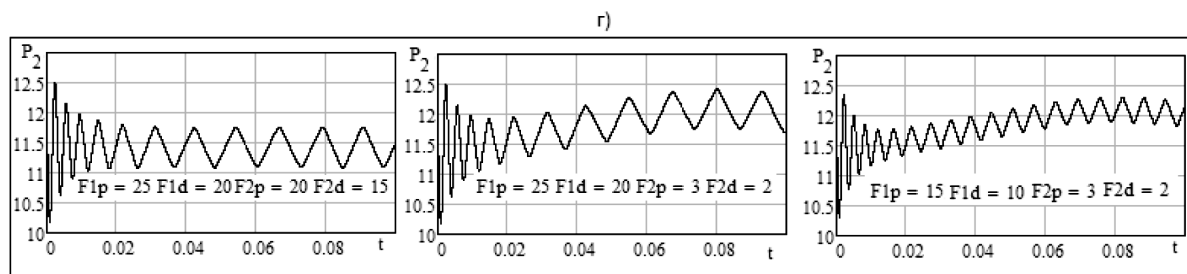


Рис. 4. Переходные функции регулируемого давления (а – влияние сил сухого трения ОК для переходного процесса, б – влияние сил сухого трения ОК в установившемся режиме, в – влияние сил сухого трения УК, г – влияние сил сухого трения ОК и УК).

Следует заметить, что при наличии автоколебаний (не затухающих колебаний в «установившемся» режиме) сила трения покоя равна нулю. В соответствии с результатами моделирования ($F1_p = F1_d$, $F2_p = F2_d$, рис. 4) при этом существенно изменяется динамика и статика регулятора в лучшую сторону. Конечно, если амплитуда автоколебаний мала, а частота достаточно велика для реализации вибрационной линеаризации.

Экспериментальные исследования

Схема стенда, соответствующего модели, представленной на рис. 2, показана на рис. 5. Базовые условия эксперимента сводятся к тому, что [6]:

1. датчик с контрольно – измерительной аппаратурой (КИА) измеряют избыточное давление \tilde{P}_{ex} относительно давления P_o в боксе. При выполнении эксперимента $P_o = const$;
- 2) приведенный к давлению P_o объемный расход Q_o постоянный и известен. Соответствующее уравнение (производная уравнения Клапейрона) равно: $P_o Q_o = \dot{M}RT$. С другой стороны при том же массовом расходе \dot{M} для любого фиксированного абсолютного давления P_{ex} в левой полости поршня (рис. 5) можно записать: $P_{ex} \dot{W} = \dot{M}RT$, $\dot{W} = S_p v$; S_p, v – площадь поршня и скорость его движения. Учитывая, что $P_{ex} = \tilde{P}_{ex} + P_o$, получим $P_o Q_o = (\tilde{P}_{ex} + P_o) S_p v$. Если избыточное давление \tilde{P}_{ex} , измеряется, то скорость движения поршня определяется равенством;
- 3) в момент, когда поршень трогается с места, регистрируется избыточное давление \hat{P}_{ex} . Тогда сила трения покоя равна $F_{tp} = S_p \hat{P}_{ex}$; 4) в установившемся режиме поршень двигается с постоянной скоростью при постоянном избыточном давлении \bar{P}_{ex} , которое регистрируется.

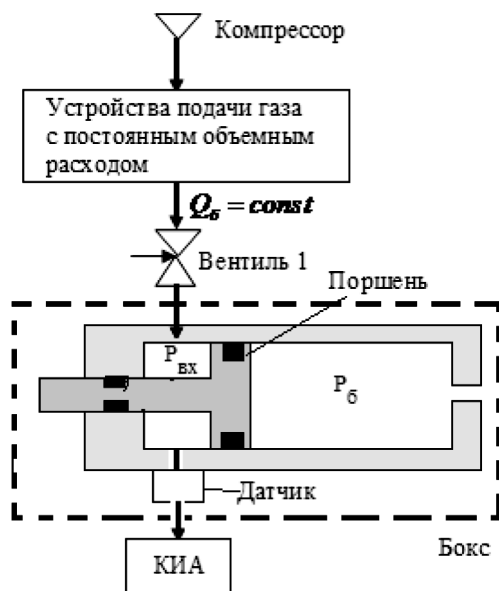


Рис. 5. Схема стенда

Последовательность вычисления параметров трения: силы сухого трения движения F_{td} и коэффициента вязкого трения k_t .

1. Задается объемный расход $Q_{\text{об}i} = \text{const}$ и регистрируется установившееся избыточное давление \bar{P}_{ex} . Получаем выборку $(Q_{\text{об}i}, [M^3 / c], \bar{P}_{\text{ex}i}, [H / M^2]), i = 1, n$.
2. После пересчета $v_i = \frac{P_{\text{об}} Q_{\text{об}i}}{(\bar{P}_{\text{ex}i} + P_{\text{об}}) S_p}$, $F_{ti} = S_p \bar{P}_{\text{ex}i}$ получаем выборку $(v_i, [M / c]; F_{ti}, [H]), i = 1, n$.
3. Полагая, что сила трения движения F_{td} не зависит от величины скорости поршня, получим уравнение регрессии $F_{ti} = F_{td} + k_t v_i, i = 1, n$. Применяя метод наименьших квадратов, получим искомые параметры трения:

$$k_t = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n v_i F_{ti} - \sum_{i=1}^n v_i \cdot \sum_{i=1}^n F_{ti}}{n \cdot \sum_{i=1}^n v_i^2 - (\sum_{i=1}^n v_i)^2}; F_{td} = \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n F_{ti} - k_t \sum_{i=1}^n v_i)$$

Изложенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Сухое трение основного клапана существенно ухудшает динамику регулятора, но практически не влияет на статическую ошибку.
2. Сухое трение управляющего клапана существенно увеличивает статическую ошибку регулятора, но практически не влияет на динамику регулятора.

3. Наличие автоколебаний малой амплитуды и высокой частоты наряду с устранением зоны нечувствительности регулятора меняет структуру сухого трения, устраняя сухое трение покоя.
4. Если параметры трения; сила сухого трения покоя, сила сухого трения движения, коэффициент вязкого трения, определяются экспериментально, то при моделировании регулятора правомерно использовать простые модели сухого трения.

Библиография :

1. Илюшин Ю.С., Олизаров В.В. Кислородное оборудование летательных аппаратов и высотное спецснаряжение. М.: Воениздат, 1970. 280 с.
2. Бухтияров И.В., Усов В.М., Дворников М.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Чернуха В.Н. Технология биоадаптивного управления функционированием средств обеспечения жизнедеятельности человека в условиях измененной газовой среды // Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 5. С. 32–36.
3. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Дворников М.В., Кисляков Ю.Ю., Рыженков С.П. Расчет риска потери работоспособности человеком в условиях низкого барометрического давления // Полет. Общероссийский научно–технический журнал. 2012. № 11. С. 37–45.
4. Кукушкин Ю.А., Дворников М.В., Богомолов А.В., Матюшев Т.В., Поляков А.В. Математическое обеспечение рискометрии состояний человека в экстремальных и аварийных ситуациях, сопряженных с гипоксическим воздействием // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 10. С. 25–33.
5. Ушаков И.Б., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Карпов В.Н. Потенциальная ненадежность действий оператора как характеристика степени влияния физико–химических факторов условий деятельности // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 1. С. 24.
6. Дворников М.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Матюшев Т.В. Технология синтеза законов управления человеко–машинными системами, эксплуатируемыми в условиях высокого риска гипоксических состояний человека // Двойные технологии. 2014. № 1 (66). С. 8–11.
7. Гузий А.Г., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Теоретические основы функционально–адаптивного управления системами «человек–машина» повышенной аварийности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 1. С. 39–48.
8. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Шибанов Г.П., Чернуха В.Н. Устройство для прогнозирования работоспособности летчика в высотном полете. Патент на полезную модель № 136609. Заявл. 23.09.2013, опубл. 10.01.2014, бюлл. №1. 2 с.
9. Кукушкин Ю.А., Дворников М.В., Богомолов А.В., Шишов А.А., Сухолитко В.А., Симоненко А.П., Степанов В.К. Особенности поддержки принятия решений по устранению особых событий и опасных состояний летчика в высотном полете // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 6. С. 74–79.
10. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Шибанов Г.П., Чернуха В.Н. Устройство для прогнозирования времени аварийной разгерметизации салона самолёта. Патент на полезную модель № 140940. Заявл. 09.01.2014, опубл. 20.05.2014, бюлл. №14. 2 с.

11. Илюхин В.Н. Динамика регуляторов давления магистральных газопроводов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 8, №4, 2006. С 1114–1120.
12. Замятин В.Г. Динамика газового регулятора с пневматической пружиной // Динамика сложных систем. №1, т. 7, 2013. С. 69–73.
13. Замятин В.Г, Кастерский С.М. Математическая модель газового регулятора с пневматической пружиной // Информационно–измерительные и управляющие системы. №7, т. 9, 2011. С.21–27.
14. Арзуманов Ю.Л., Петров Р.А., Халатов Е.М. Системы газоснабжения и устройства пневмоавтоматики ракетно–космических комплексов. М.: Машиностроение, 1997. 229 с.
15. Замятин В.Г, Кастерский С.М, Чернуха В.Н. Автоколебания в системе с несколькими нелинейностями // Динамика сложных систем. №1, т. 7, 2013. С. 74–78.
16. Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А., Дворников М.В. Математическое моделирование динамики гипоксических состояний человека // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 40.
17. Гузий А.Г., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Методология стабилизации функционального состояния оператора системы “человек–машина” // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 5. С. 9.
18. Кукушкин Ю.А., Дворников М.В., Степанов В.К., Сухолитко В.А., Богомолов А.В. Анализ проблем защиты летчика от воздействия высотного фактора полета // Проблемы безопасности полетов. 2002. № 10. С. 27.
19. Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А., Шишов А.А., Филатов В.Н. Индикатор резервного времени сохранения сознания человеком в условиях гипоксической гипоксии. Патент на полезную модель № 136206. Заявл. 02.09.2013, опубл. 27.12.2013, бюлл. №36. 2 с.
20. Матюшев Т.В., Дворников М.В., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А., Поляков А.В. Математическое моделирование динамики показателей газообмена человека в условиях гипоксии // Математическое моделирование. Т. 26, № 4, 2014. С. 51–64.
21. Матюшев Т.В., Дворников М.В., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Управление длительностью десатурации членов экипажа пилотируемых космических объектов с использованием математического моделирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 2. С. 45–52.
22. Ушаков И.Б., Пономаренко В.А., Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В. Автоматизированные системы для контроля состояния специалистов опасных профессий // Безопасность жизнедеятельности. 2005. № 10 (приложение). 24 с.
23. Кукушкин Ю.А., Гузий А.Г., Богомолов А.В. Методология стабилизации функционального состояния оператора системы «человек – машина» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 5. С. 17.
24. Коломиец Л.В., Федоров М.В., Богомолов А.В., Мережко А.Н., Солдатов А.С., Есев А.А. Метод поддержки принятия решений по управлению ресурсами при испытаниях авиационной техники // Информационно–измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 5. С. 38–40.
25. Фёдоров М.В., Богомолов А.В., Цыганок Г.В., Айвазян С.А. Технология проектирования многофакторных экспериментальных исследований и построения эмпирических моделей комбинированных воздействий на операторов эргатических систем // Информационно–измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 5. С. 53–61.
26. Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов А.В. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем // Информационно–измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5. № 1. С. 66–72

References:

1. Ilyushin Yu.S., Olizarov V.V. Kislородное oborudovanie letatel'nykh apparatov i vysotnoe spetssnaryazhenie. M.: Voenizdat, 1970. 280 s.
2. Bukhtiyarov I.V., Usov V.M., Dvornikov M.V., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Chernukha V.N. Tekhnologiya bioadaptivnogo upravleniya funktsionirovaniem sredstv obespecheniya zhiznedeyatel'nosti cheloveka v usloviyakh izmenennoi gazovoi sredy // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2004. № 5. S. 32–36.
3. Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Dvornikov M.V., Kislyakov Yu.Yu., Ryzhenkov S.P. Raschet riska poteri rabotosposobnosti chelovekom v usloviyakh nizkogo barometricheskogo davleniya // Polet. Obshcherossiiskii nauchno–tekhnikeskii zhurnal. 2012. № 11. S. 37–45.
4. Kukushkin Yu.A., Dvornikov M.V., Bogomolov A.V., Matyushev T.V., Polyakov A.V. Matematicheskoe obespechenie riskometrii sostoyanii cheloveka v ekstremal'nykh i avariinykh situatsiyakh, sopryazhennykh s gipoksicheskimi vozdeistviem // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2012. № 10. S. 25–33.
5. Ushakov I.B., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Karpov V.N. Potentsial'naya nenadezhnost' deistviya operatora kak kharakteristika stepeni vliyaniya fiziko–khimicheskikh faktorov uslovii deyatel'nosti // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2001. № 1. S. 24.
6. Dvornikov M.V., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Matyushev T.V. Tekhnologiya sinteza zakonov upravleniya cheloveko–mashinnymi sistemami, ekspluatiruemyimi v usloviyakh vysokogo riska gipoksicheskikh sostoyanii cheloveka // Dvoinye tekhnologii. 2014. № 1 (66). S. 8–11.
7. Guzii A.G., Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A. Teoreticheskie osnovy funktsional'no–adaptivnogo upravleniya sistemami «chelovek–mashina» povyshennoi avariinosti // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2005. № 1. S. 39–48.
8. Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Shibanov G.P., Chernukha V.N. Ustroistvo dlya prognozirovaniya rabotosposobnosti letchika v vysotnom polete. Patent na poleznuyu model' № 136609. Zayavl. 23.09.2013, opubl. 10.01.2014, byull. №1. 2 s.
9. Kukushkin Yu.A., Dvornikov M.V., Bogomolov A.V., Shishov A.A., Sukholitko V.A., Simonenko A.P., Stepanov V.K. Osobennosti podderzhki prinyatiya reshenii po ustraneniyu osobykh sobytii i opasnykh sostoyanii letchika v vysotnom polete // Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii. 2009. № 6. S. 74–79.
10. Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Shibanov G.P., Chernukha V.N. Ustroistvo dlya prognozirovaniya vremeni avariinoy razgermetizatsii salona samoleta. Patent na poleznuyu model' № 140940. Zayavl. 09.01.2014, opubl. 20.05.2014, byull. №14. 2 s.
11. Ilyukhin V.N. Dinamika regulyatorov davleniya magistral'nykh gazoprovodov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, t. 8, №4, 2006. S 1114–1120.
12. Zamyatin V.G. Dinamika gazovogo regulyatora s pnevmaticheskoi pruzhinoy // Dinamika slozhnykh sistem. №1, t. 7, 2013. S. 69–73.
13. Zamyatin V.G., Kastetskii S.M. Matematicheskaya model' gazovogo regulyatora s pnevmaticheskoi pruzhinoy // Informatsionno–izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. №7, t. 9, 2011. S.21–27.
14. Arzumanov Yu.L., Petrov R.A., Khalatov E.M. Sistemy gazosnabzheniya i ustroystva pnevmoavtomatiki raketno–kosmicheskikh kompleksov. M.: Mashinostroenie, 1997. 229 s.

15. Zamyatin V.G, Kastetskii S.M, Chernukha V.N. Avtokolebaniya v sisteme s neskol'kimi nelineinostyami // *Dinamika slozhnykh sistem*. №1, t. 7, 2013. S. 74–78.
16. Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A., Dvornikov M.V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki gipoksicheskikh sostoyanii cheloveka // *Programmnye produkty i sistemy*. 2013. № 2. S. 40.
17. Guzii A.G., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V. Metodologiya stabilizatsii funktsional'nogo sostoyaniya operatora sistemy "chelovek–mashina" // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2002. № 5. S. 9.
18. Kukushkin Yu.A., Dvornikov M.V., Stepanov V.K., Sukholitko V.A., Bogomolov A.V. Analiz problem zashchity letchika ot vozdeistviya vyshotnogo faktora poleta // *Problemy bezopasnosti poletov*. 2002. № 10. S. 27.
19. Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A., Shishov A.A., Filatov V.N. Indikator rezervnogo vremeni sokhraneniya soznaniya chelovekom v usloviyakh gipoksicheskoi gipoksii. Patent na poleznuyu model' № 136206. Zayavl. 02.09.2013, opubl. 27.12.2013, byull. №36. 2 s.
20. Matyushev T.V., Dvornikov M.V., Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A., Polyakov A.V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki pokazatelei gazoobmena cheloveka v usloviyakh gipoksii // *Matematicheskoe modelirovanie*. T. 26, № 4, 2014.S. 51–64.
21. Matyushev T.V., Dvornikov M.V., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V. Upravlenie dlitel'nost'yu desaturatsii chlenov ekipazha pilotiruemykh kosmicheskikh ob'ektov s ispol'zovaniem matematicheskogo modelirovaniya // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. № 2. S. 45–52.
22. Ushakov I.B., Ponomarenko V.A., Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V. Avtomatizirovannye sistemy dlya kontrolya sostoyaniya spetsialistov opasnykh professii // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2005. № 10 (prilozhenie). 24 s.
23. Kukushkin Yu.A., Guzii A.G., Bogomolov A.V. Metodologiya stabilizatsii funktsional'nogo sostoyaniya operatora sistemy «chelovek –mashina» // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2002. № 5. S. 17.
24. Kolomiets L.V., Fedorov M.V., Bogomolov A.V., Merezko A.N., Soldatov A.S., Esev A.A. Metod podderzhki prinyatiya reshenii po upravleniyu resursami pri ispytaniyakh aviatsionnoi tekhniki // *Informatsionno–izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*. 2010. T. 8. № 5. S. 38–40.
25. Fedorov M.V., Bogomolov A.V., Tsyganok G.V., Aivazyan S.A. Tekhnologiya proektirovaniya mnogofaktornykh eksperimental'nykh issledovaniy i postroyeniya empiricheskikh modelei kombinirovannykh vozdeistviy na operatorov ergaticheskikh sistem // *Informatsionno–izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*. 2010. T. 8. № 5. S. 53–61.
26. Rudakov I.S., Rudakov S.V., Bogomolov A.V. Metodika identifikatsii vida zakona raspredeleniya parametrov pri provedeniyi kontrolya sostoyaniya slozhnykh sistem // *Informatsionno–izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*. 2007. T. 5. № 1. S. 66–72