

ризиків і не охоплює всього різноманіття процесів виникнення і розвитку аварій на небезпечних виробничих об'єктах.

1. *Альмов В.Т.* Техногенный риск: Анализ и оценка : [учебное пособие для вузов] // В.Т. Альмов, Н.П. Тарасова. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 118 с.
2. *Хміль Г.А.* Концептуально-методичний апарат аналізу й оцінки техногенного та природного ризиків / Г.А. Хміль // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – Вип. 5. – С. 47–55.
3. *Качинський А.Б.* Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи / А.Б. Качинський. – К. : Поліграфконсалтинг, 2004. – 472 с.
4. *Лисиченко Г.В.* Методологія оцінювання екологічних ризиків / Г.В. Лисиченко, Г.А. Хміль, С.В. Барбашев. – О. : Астропринт, 2011. – 368 с.
5. *Попов О.О.* Математичні моделі оцінки техногенного ризику / О.О. Попов // Электронное моделирование. – 2015. – Т. 37. – № 5. – С. 49–60.
6. *Попов О.О.* Методи аналізу ризиків в екології / О.О. Попов // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2013. – Вип. 69. – С. 19–28.
7. *Ковач В.О.* Сучасні методи аналізу ризиків в задачах управління екологічною безпекою на техногенно забруднених територіях / В.О. Ковач, В.О. Артемчук, В.О. Куценко // Техногенна безпека та цивільний захист. – 2016. – № 10. – С. 56–64.
8. *Яцишин А.В.* Методы и технологии анализа рисков для здоровья на основе данных мониторинга / А.В. Яцишин, І.П. Каменева, О.О. Попов, В.О. Артемчук // Материали IV Международной научно-технической конференции «МОДЕЛИРОВАНИЕ-2012», (г. Киев, 16-18 мая 2012 г.). – К. : ИПМЭ НАН Украины, 2012. – С. 469–473.
9. *Попов О.О.* Прогнозування аварійного ризику / О.О. Попов // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. – 2013. – № 6. – С. 28–33.

Поступила 13.04.2017р.

УДК 621.56 : 629.7

А.А.Чирва, Киев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОГО КРАНА-РЕГУЛЯТОРА ВОЗДУШНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТА

Abstract. The article presents mathematical model for the regulator, which can be used for transient simulation of hydraulic and thermal processes in the regulator what is mounted in plane pneumatic system.

Введение. В пневматических системах самолета краны-регуляторы обеспечивают поддержание в определенном месте трубопровода требуемого давления воздуха. Ввиду того, что процессы в самолетных системах протекают с большой скоростью, применяют пневматические краны-

регуляторы, которые позволяют обеспечить требуемое быстродействие. Также, данный тип кранов-регуляторов обеспечивает высокий ресурс и пожаробезопасность. Управление краном-регулятором осуществляет электронный прибор управления пневматической системы.

Отработка алгоритмов управления, в основном, осуществляется на лабораторных стендах. Параметры воздуха на таких стендах значительно отличаются от параметров воздуха в самолетных системах, что приводит к дополнительным затратам по отработке алгоритмов управления крана-регулятора в составе самолета. Для уменьшения стоимости этапа отработки, а также проверки работы крана-регулятора на различных режимах полета самолета, в том числе и при отказных ситуациях, разработана математическая модель пневматического крана-регулятора.

Пневматический кран-регулятор.

Схема крана-регулятора представлена на рис.1. Кран регулятор состоит из следующих агрегатов:

- предварительный редуктор,
- управляющий механизм,
- исполнительный механизм.

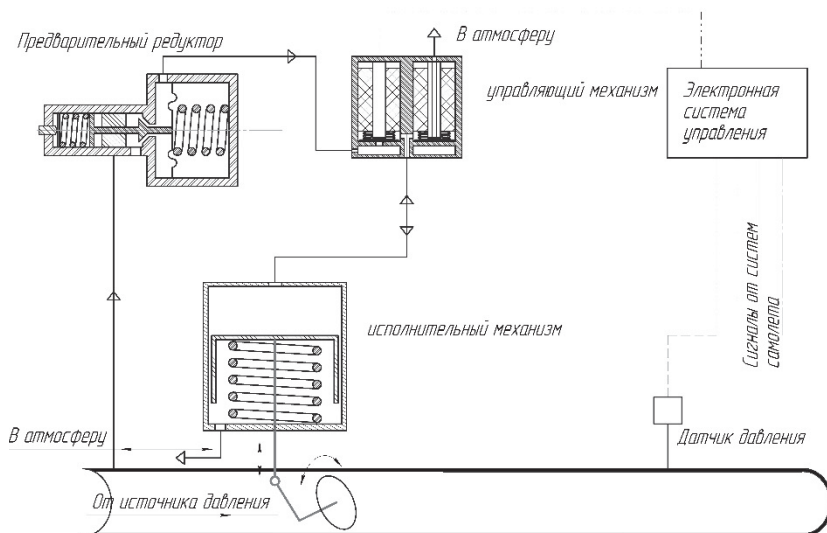


Рис. 1. Схема пневматического крана-регулятора

Воздух для питания крана-регулятора отбирается из трубопровода перед регулятором. Предварительный редуктор обеспечивает стабильное значение давления перед управляющим механизмом в не зависимости от параметров

воздуха перед краном-регулятором. Управляющий механизм обеспечивает подачу воздуха от предварительного редуктора в исполнительный механизм или стравливание воздуха с исполнительного механизма. Электронный прибор управления сравнивает текущее значение давления воздуха в системе, полученное от датчика, со значением, требуемым на данном режиме работы. По результатам сравнения выдаются сигналы управляющему механизму для выполнения подачи или стравливания воздуха с исполнительного механизма. В результате заслонка исполнительного механизма поворачивается пока не обеспечится минимальное рассогласование между текущим и требуемым давлением воздуха в системе.

Процесс управления краном-регулятором осуществляется широтно-импульсной модуляцией.

Предварительный редуктор давления.

Предварительный редуктор состоит из золотника с поршнями на концах. При отклонении давления на выходе из редуктора от требуемого нарушается устойчивое состояние золотника. Разница между силами давления, действующая на поршни золотника, и силами упругости пружин передвигает золотник, изменяя площадь проходного сечения редуктора. При этом изменяется давление на выходе из редуктора пока равнодействующая сил давления и упругости не станет равной нулю.

Для описания процессов происходящих в редукторе используем два уравнения:

- уравнение неразрывности

$$\frac{dm_{\text{возд}}}{d\tau} = \frac{V_{\text{ред}}}{RT} \frac{dp_{\text{ред}}}{d\tau} \quad (1)$$

- уравнение усилий на золотнике

$$m_{\text{ред}} \frac{d^2 x_{\text{ред}}}{d\tau^2} = (P_{\text{затпр1}} - Z_{\text{пр1}} x_{\text{ред}}) + (P_{\text{затпр2}} - Z_{\text{пр2}} x_{\text{ред}}) - p_{\text{ред1}} \cdot S_{\text{порш1}} - p_{\text{ред2}} \cdot S_{\text{порш2}} + N \frac{dx_{\text{ред}}}{d\tau} \quad (2)$$

В свою очередь

$$\frac{dm_{\text{возд}}}{d\tau} = G_{\text{вход}}(p_{\text{маг}}, p_{\text{ред2}}) - G_{\text{выход}}(p_{\text{ред2}}, F_{\text{ред}}) \quad (3)$$

$m_{\text{возд}}$ - масса воздуха в объеме редуктора; $V_{\text{ред}}$ - объем воздуха в редукторе; $p_{\text{ред}}$ - статическое давление воздуха в редукторе; $p_{\text{маг}}$ - давление в магистральном трубопроводе; $G_{\text{вход}}(p_{\text{маг}}, p_{\text{ред2}})$, $G_{\text{выход}}(p_{\text{ред2}}, F_{\text{ред}})$ - функции расходов воздуха на входе и

выходе из редуктора; $F_{ред}$ - площадь дросселируемого отверстия; $x_{ред}$ - положение золотника редуктора; $P_{затнр}$ - предварительная затяжка пружины, $Z_{пр}$ - жесткость пружины; $P_{ред}$ - давление в полостях редуктора; $S_{порш}$ - площадь поршня редуктора; N - коэффициент трения скользящей пары.

Используя метод конечных разностей, запишем конечноразностные уравнения для неявной схемы:

$$G_{вход}(p_{маз}^{j+1}, p_{ред0}^{j+1}) - G_{выход}(p_{ред2}^{j+1}, F_{ред}) = \frac{V_{ред}}{RT} \frac{P_{ред}^{j+1} - P_{ред}^j}{\Delta \tau} \quad (4)$$

$$m_{ред} \frac{x_{ред}^{j+1} - 2x_{ред}^j + x_{ред}^{j-1}}{\Delta \tau^2} = (P_{затнр1} - Z_{пр1}x_{ред}^{j+1}) + \\ + (P_{затнр2} - Z_{пр2}x_{ред}^{j+1}) - p_{ред0} \cdot S_{порш1} - p_{ред2} \cdot S_{порш2} + N \frac{x_{ред}^{j+1} - x_{ред}^j}{\Delta \tau} \quad (5)$$

j – шаг по времени

Тогда, после преобразований получим уравнения для определения давления за редуктором и положения золотника

$$p_{ред}^{j+1} = p_{ред}^j + \frac{RT}{V_{ред}} (G_{вход}(p_{ред0}^{j+1}) - G_{выход}(p_{ред2}^{j+1}, F_{ред})) \Delta \tau \quad (6)$$

$$x_{ред}^{j+1} = \frac{\Delta \tau^2}{m_{ред} + N \Delta \tau + (Z_{пр1} - Z_{пр2}) \Delta \tau^2} \times \\ \times \left(P_{затнр2} - P_{затнр1} - p_{ред0}^{j+1} S_{порш2} + \frac{m_{ред}}{\Delta \tau^2} (2x_{ред}^j - x_{ред}^{j-1}) + N \frac{x_{ред}^j}{\Delta \tau} \right) \quad (7)$$

Также накладываются дополнительные ограничения на перемещение золотника.

$$x_{ред}^{j+1} = x_{\max} \quad \text{если} \quad x_{ред}^{j+1} \geq x_{\max}; \quad x_{ред}^{j+1} = x_{\min} \quad \text{если} \quad x_{ред}^{j+1} \leq x_{\min} \quad (8)$$

Управляющий механизм

Пневматическая схема управляющего механизма представлена на рисунке 2. Два электромагнитных клапана по принципу инжектора дозируют подачу воздуха в исполнительный механизм. При необходимости увеличить угол открытия заслонки электронный блок управления подает питание на клапан соединяющий линию подачи воздуха и линию, идущую к исполнительному устройству. При этом клапан, соединяющий с атмосферой, закрыт. Для уменьшения угла открытия, подается питание на клапан стравливания воздуха в атмосферу.

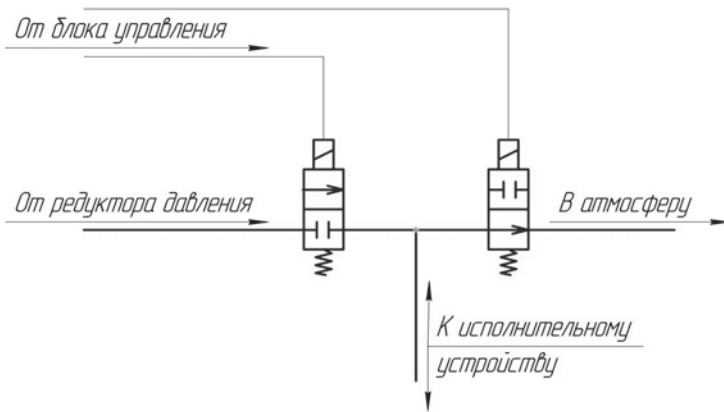


Рис. 2. Пневматическая схема управляющего устройства

Используем следующие уравнения:

- уравнение электрической энергии для электромагнита

$$U = I \cdot R(T_{кл}) + L \frac{dI}{d\tau} \quad (9)$$

- уравнение неразрывности для внутреннего объема управляющего устройства

$$\frac{V_{yy}}{RT} \frac{dp_{yy}}{d\tau} = G_{кльход}(x_{кльход}) - G_{кльвых}(x_{кльвых}) - G_{исп}(p_{yy}^{j+1}, p_{исп}^{j+1}) \quad (10)$$

- уравнение усилий для механической части электроклапана

$$m_{кл} \frac{d^2 x_{кл}}{d\tau^2} = -(P_{затпр} + Z_{пр} x_{кл}) + \frac{L^2 \cdot I^2}{2\mu_0 \mu_{серд} S_{серд}} \quad (11)$$

- уравнение тепловой энергии для катушки электромагнита

$$c_p m_{кл} \frac{dT_{кл}}{d\tau} = I^2 \cdot R(T_{кл}) + \frac{T_{кл} - T_{нв}}{\frac{1}{\alpha_{нв}} + \frac{\delta_{кл}}{\lambda_{кл}}} \quad (12)$$

U , I - электрическое напряжение и ток через катушку электромагнита; $R, T_{кл}$ - сопротивление катушки электромагнита и ее температура; L - индуктивность электромагнита;

V_{yy} , p_{yy} - объем полости и давление воздуха в управляющем устройстве; $G_{кльход}$, $G_{кльвых}$, $G_{исп}$ - расход воздуха через входной клапан, клапан сброса и на исполнительное устройство;

$m_{кл}$ - масса подвижных частей электроклапана; $x_{кл}$ - положение

клапана; $\frac{L^2 \cdot I^2}{2\mu_0\mu_{серд}S_{серд}}$ - сила создаваемая электромагнитом.

Конечная форма уравнений для управляющего устройства имеет вид

$$I^{j+1} = \left(U + I^j \frac{L}{\Delta\tau} \right) \frac{1}{R(T_{кл}) + \frac{L}{\Delta\tau}} \quad (12)$$

$$p_{yy}^{j+1} = p_{yy}^j + \frac{RT}{V_{yy}} \left(G_{кльход} \left(x_{кльход}^{j+1}, p_{yy}^{j+1}, p_{ред}^{j+1} \right) - G_{кльых} \left(x_{кльых}^{j+1}, p_{yy}^{j+1}, p_{исп}^{j+1} \right) - G_{исп} \left(p_{yy}^{j+1}, p_{исп}^{j+1} \right) \right) \Delta\tau \quad (13)$$

$$x_{кл}^{j+1} = \left(-P_{затпр} + \frac{L^2 \cdot I^2}{2\mu_0\mu_{серд}S_{серд}} - m_{кл} \frac{x_{кл}^{j-1} - 2x_{кл}^j}{\Delta\tau^2} \right) \frac{1}{\frac{m_{кл}}{\Delta\tau^2} + Z_{пр}} \quad (14)$$

Исполнительное устройство

Исполнительное устройство состоит из пневмоцилиндра со штоком, который соединен с заслонкой. При положении штока в верхней точке заслонка закрыта. При увеличении давления в полости над поршнем, шток открывает заслонку.

Запишем уравнения для исполнительного устройства:

$$\frac{V_{исп} + S_{порш}x_{порш}}{RT} \frac{dp_{исп}}{d\tau} + \frac{S_{порш}p_{исп}}{RT} \frac{dx_{порш}}{d\tau} = G_{исп} \quad (15)$$

$$m_{порш} \frac{d^2x_{порш}}{d\tau^2} = (p_{исп} - p_{нв})S_{порш} - (P_{затпр} - Z_{пр}x_{кл}) - P_{шток} \quad (16)$$

$V_{исп}$ - объем полости над поршнем; $S_{порш}, x_{порш}$ - площадь поршня и положение штока; $p_{исп}$ - давление воздуха в исполнительном механизме; $G_{исп}$ - расход воздуха на входе в исполнительное устройство; $m_{порш}$ - масса подвижных частей штока; $p_{нв}$ - давление наружного воздуха; $P_{шток}$ - сила действующая на шток от заслонки.

Конечноразностная форма уравнений после преобразований имеет вид:

$$p_{исп}^{j+1} = \left(\left(V_{исп} + S_{порш}x_{порш}^{j+1} \right) \frac{dp_{исп}}{\Delta\tau} + R \cdot T \cdot G_{исп} \left(p_{yy}^{j+1}, p_{исп}^{j+1} \right) \right) \times \frac{\Delta\tau}{V_{исп} + S_{порш} \left(2x_{порш}^{j+1} - x_{порш}^j \right)} \quad (17)$$

$$x_{\text{порш}}^{j+1} = \frac{(P_{\text{исп}} - P_{\text{нв}})S_{\text{порш}} - P_{\text{затпр}} - P_{\text{шток}} + m_{\text{порш}} \frac{(2x_{\text{порш}}^{j+1} - x_{\text{порш}}^{j-1})}{\Delta\tau^2}}{\frac{m_{\text{порш}}}{\Delta\tau^2} + Z_{\text{пр}}} \quad (18)$$

Зависимость угла поворота заслонки от положения штока поршня имеет следующий вид:

$$\alpha_{\text{засл}} = a \cos \left(\frac{1 - (x_{\text{порш}}^{j+1} + L_{\text{кр}}(1 - \cos(\alpha_0)))}{L_{\text{кр}}} \right) \quad (19)$$

$L_{\text{кр}}$ - длина кривошипа

α_0 - угол установки кривошипа

Расход воздуха определяется по формуле:

– для до критического режима:

$$G = \mu \cdot P_{\text{вход}} \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{T}{R} \cdot \left(\left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вход}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вход}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad (20)$$

– для критического режима:

$$G = \mu \cdot P_{\text{вход}} \cdot S \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T}{R} \cdot \frac{2k}{k-1} \cdot \left(\frac{2}{2+k} \right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad (21)$$

μ - коэффициент расхода; S - площадь отверстия; $P_{\text{вход}}$, $P_{\text{вых}}$ - давление перед и за дросселирующим отверстием; k - отношение удельных теплоемкостей.

Для выполнения расчета нестационарных гидравлических процессов протекающих в кране-регуляторе по указанной модели необходимо задать все конструктивные характеристики клапана (объемы, вес элементов, размеры, параметры электромагнитов), начальное положение всех подвижных элементов. Входными данными являются давление в магистральном трубопроводе и управляющие импульсы на электромагниты управляющего устройства. На выходе определяется угол поворота заслонки для дальнейшего гидравлического расчета магистрального трубопровода.

Поскольку использована неявная схема составления конечноразностных уравнений, на каждом шаге по времени происходит увязка решения методом Зейделя.

На рис. 3 приведены результаты моделирования: изменение угла поворота заслонки при различном сочетании сигналов выданных блоку управления управляющему механизму.

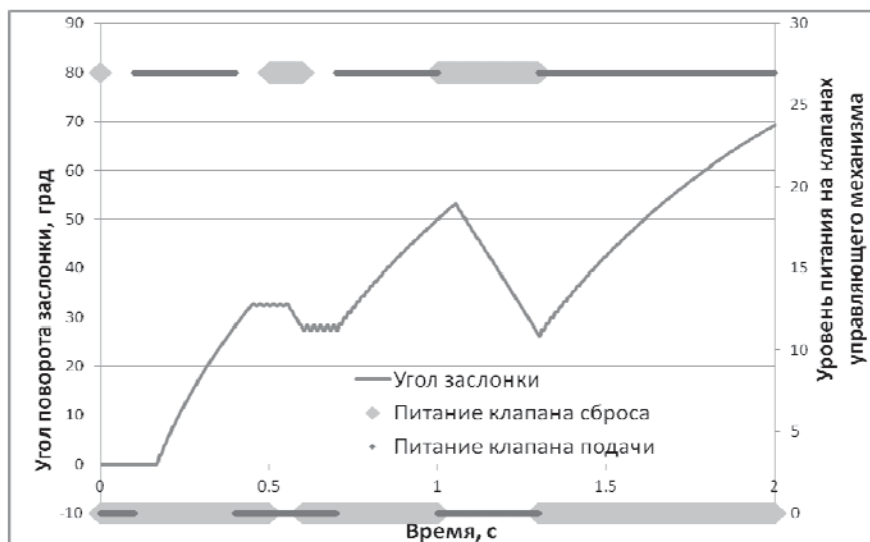


Рис. 3. Изменение угла поворота заслонки при подаче управляющих сигналов.

Выводы

В статье представлена математическая модель пневматического крана-регулятора, которая позволяет определить реакцию регулятора, в виде поворота заслонки, на изменение атмосферного давления и параметров воздуха в магистрали перед регулятором, а также на управляющие сигналы от электронного блока управления. Положение регулирующей заслонки используется для определения давления воздуха в системе за регулятором с помощью модели расчета нестационарных гидравлических процессов в трубопроводе.

1. Хлестун А.И. Динамические характеристики регулятора давления пневматической системы самолета// Пром. гидравлика и пневматика. - 2004. - №3(5).- С. 62-64.
2. Идельчик И.Е. Гидравлические сопротивления. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М.:Машиностроение, 1992.-559с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - Изд. 3-е, перераб. - М.: Наука, 1969. - 824 с.

Поступила 12.04.2017р.