

замінити E_0 і K_{JM} їх оцінками. У процесі налагодження та дослідної або нормальної експлуатації програмного комплексу з'являється можливість використати статистичні дані про виявлені та виправлені помилки і уточнити проектні оцінки надійності. З цією метою розроблені моделі надійності, що містять параметри, точкові оцінки яких отримують шляхом обробки результатів налагодження та експлуатації ПК. Моделі відрізняються одна від одної припущеннями про характер залежності інтенсивності появи помилок від тривалості налагодження та експлуатації. Деякі моделі містять певні вимоги до внутрішньої структури програмних модулів

1. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д., - М.: Изд. «Наука». – 1965. – 526с.
2. Основи надійності інформаційних систем: підручник / С.М. Головань, О.В.Корнейко, О.С. Хорошко, Л.М. Щербак. – Луганськ: Вид-во «Ноулідж», 2012.- 335с.
3. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-програмных комплексов / Черкесов Г.Н. – Санк.-Петербург.:Питер. – 2005. – 479с.

Поступила 20.10.2016р.

УДК 621.56 : 629.7

А.А. Чирва, г. 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.

Воздух для питания крана-регулятора отбирается из трубопровода перед регулятором. Предварительный редуктор обеспечивает стабильное значение давление 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.

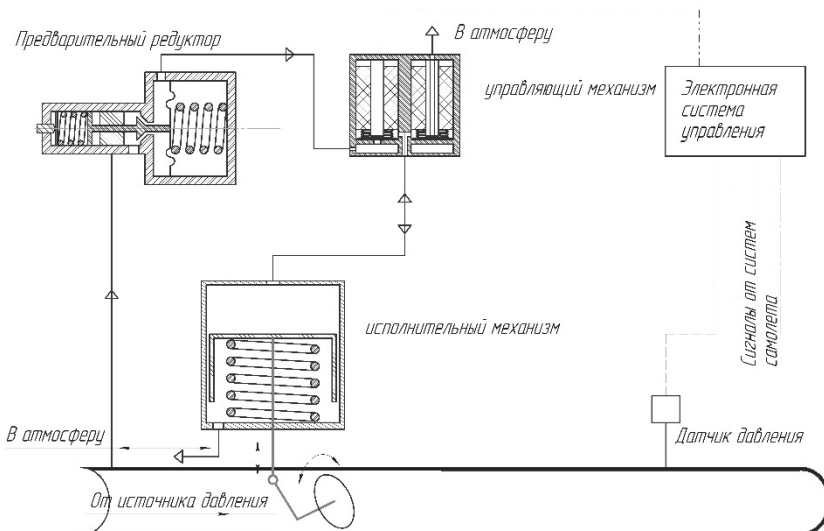


Рис. 1. Схема пневматического крана-регулятора

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

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

- уравнение усилий на золотнике

$$m_{ред} \frac{d^2 x_{ред}}{d\tau^2} = (P_{затнр1} - Z_{пр1} x_{ред}) + (P_{затнр2} - Z_{пр2} x_{ред}) - P_{ред1} \cdot S_{порш1} - P_{ред2} \cdot S_{порш2} + N \frac{dx_{ред}}{d\tau} \quad (2)$$

В свою очередь

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

$m_{возд}$ - масса воздуха в объеме редуктора; $V_{ред}$ - объем воздуха в редукторе; $p_{ред}$ - статическое давление воздуха в редукторе; $p_{маг}$ - давление в магистральном трубопроводе; $G_{вход}(p_{маг}, p_{ред2})$, $G_{выход}(p_{ред2}, F_{ред})$ - 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:

$$G_{\text{вход}}(p_{\text{маг}}^{j+1}, p_{\text{ред1}}^{j+1}) - G_{\text{выход}}(p_{\text{ред2}}^{j+1}, F_{\text{ред}}) = \frac{V_{\text{ред}}}{RT} \frac{p_{\text{ред}}^{j+1} - p_{\text{ред}}^j}{\Delta \tau} \quad (4)$$

$$m_{\text{ред}} \frac{x_{\text{ред}}^{j+1} - 2x_{\text{ред}}^j + x_{\text{ред}}^{j-1}}{\Delta \tau^2} = (P_{\text{затпр1}} - Z_{\text{пр1}} x_{\text{ред}}^{j+1}) + \\ + (P_{\text{затпр2}} - Z_{\text{пр2}} x_{\text{ред}}^{j+1}) - p_{\text{ред1}} \cdot S_{\text{порш1}} - p_{\text{ред2}} \cdot S_{\text{порш2}} + N \frac{x_{\text{ред}}^{j+1} - x_{\text{ред}}^j}{\Delta \tau} \quad (5)$$

j – шаг по времени

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

$$p_{\text{ред}}^{j+1} = p_{\text{ред}}^j + \frac{RT}{V_{\text{ред}}} (G_{\text{вход}}(p_{\text{ред1}}^{j+1}) - G_{\text{выход}}(p_{\text{ред2}}^{j+1}, F_{\text{ред}})) \Delta \tau \quad (6)$$

$$x_{\text{ред}}^{j+1} = \frac{\Delta \tau^2}{m_{\text{ред}} + N \Delta \tau + (Z_{\text{пр1}} - Z_{\text{пр2}}) \Delta \tau^2} \times \\ \times \left(P_{\text{затпр2}} - P_{\text{затпр1}} - p_{\text{ред1}}^{j+1} S_{\text{порш2}} + \frac{m_{\text{ред}}}{\Delta \tau^2} (2x_{\text{ред}}^j - x_{\text{ред}}^{j-1}) + N \frac{x_{\text{ред}}^j}{\Delta \tau} \right) \quad (7)$$

Также накладываются дополнительные ограничения на перемещение золотника.

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

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.

Используем следующие уравнения:

– уравнение электрической энергии для электромагнита

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

– уравнение неразрывности для внутреннего объема управляющего устройства

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

– уравнение усилий для механической части электроклапана

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

– уравнение тепловой энергии для катушки электромагнита

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

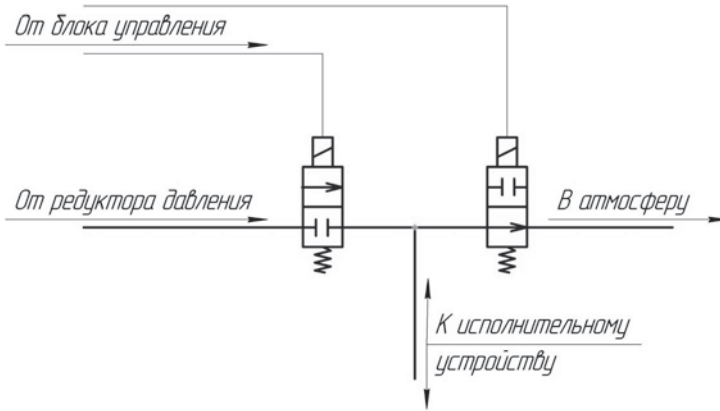


Рис. 2. Пневматическая схема управляющего устройства.

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

V_{yy}, p_{yy} - объем полости и давление воздуха в управляющем устройстве;

$G_{\text{кльвход}}, G_{\text{кльвых}}, G_{\text{исп}}$ - расход воздуха через входной клапан, клапан сброса и на исполнительное устройство;

$m_{\text{кль}}$ - масса подвижных частей электроклапана; $x_{\text{кль}}$ - положение клапана;

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

Конечная форма уравнений для управляющего устройства имеет вид

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

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

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

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:

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

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

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

Конечноразностная форма уравнений после преобразований имеет вид:

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

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

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

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

$L_{кр}$ - длина кривошипа

α_0 - угол установки кривошипа

Расход воздуха определяется по формуле:

– для до критического режима:

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

– для критического режима:

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

μ - коэффициент расхода; S - площадь отверстия; $p_{вход}$, $p_{вых}$ - 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.

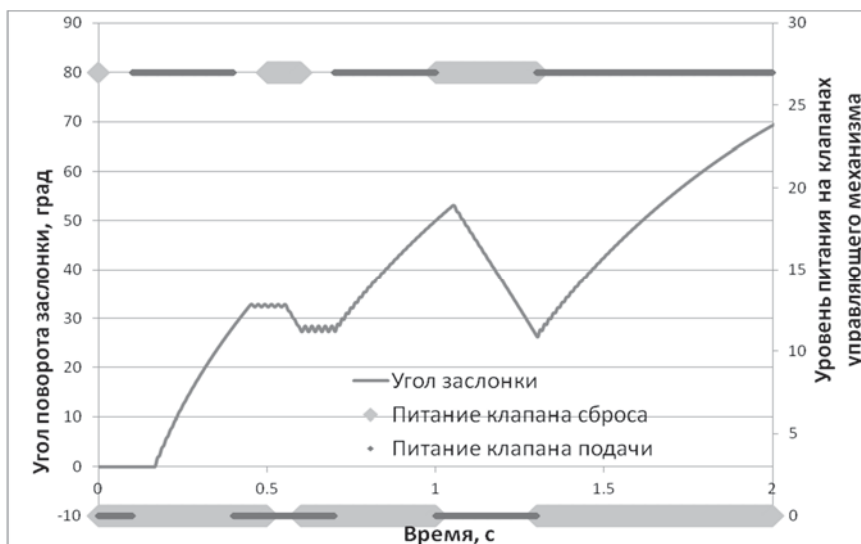


Рис. 3. Изменение угла поворота заслонки при подаче управляющих сигналов

Входними даними являються тиск в магістральному трубопроводі і керуючі імпульси на електромагніти керуючого пристрою. На виході визначається кут повороту заслонки для подальшого гідравлічного розрахунку магістрального трубопроводу.

Поскольку використана неявна схема складання кінчозначних рівнянь, на кожному кроці по часу відбувається зв'язка рішення методом Зейделя.

На рис.3 наведені результати моделювання: зміна кута повороту заслонки при різному поєднанні сигналів наданих блоку управління керуючому механізму.

Висновки. В статті представлена математична модель пневматичного крана-регулятора, яка дозволяє визначити реакцію регулятора, у вигляді повороту заслонки, на зміну атмосферного тиску і параметрів повітря в магістралі перед регулятором, а також на керуючі сигнали від електронного блоку управління. Положення регулюючої заслонки використовується для визначення тиску повітря в системі за регулятором з допомогою моделі розрахунку нестационарних гідравлічних процесів в трубопроводі.

1. Хлустун А.И. Динамічні характеристики регулятора тиску пневматичної системи літака// Пром. гідроліка і пневматика. - 2004. - №3(5).- С. 62-64.
2. Ідельчик І.Е. Гідравлічні опору. - Вид. 3-є, перероб. і доп. - М.:Машинобудування, 1992.-559с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладна газова динаміка. - Вид. 3-є, перероб. - М.: Наука, 1969. - 824 с.

Прийнята 27.10.2016р.

УДК 681.142 + 519.4

О. Д. Глухов, м. Київ

ПРО СКЛАДНІ ДИСКРЕТНІ СИСТЕМИ ВИСОКОЇ СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ

This paper investigates the connectivity properties of quasi-random graphs based on Erdős-Rényi expanders.

В даній роботі досліджена зв'язність квазіслучайних графів на базі експандерів Ердіша-Реньї.

В цій роботі буде показано, як на основі випадкового графа моделі Ердіша-Реньї побудувати складну дискретну систему високої структурної