









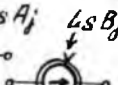

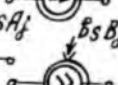
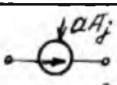
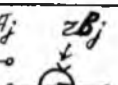
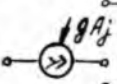
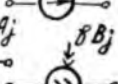
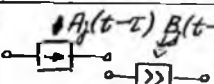
В.В. Бердников, Т.П. Тогулева, Р.П. Алтуншин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
С ТЕПЛООБМЕННИКОМ

При разработке САПР актуальна задача максимальной формализации моделей проектируемых изделий. Для формализованного описания силовых и энергетических установок, имеющих в своем составе механические, гидравлические, электрические, тепловые устройства и агрегаты, предлагается использовать прикладную теорию цепей /1/. На этой основе разработан автоматизированный метод моделирования динамики пневмогидравлических систем (ПГС) на ЭВМ /2, 3/. Данный метод предполагает: на первом этапе – построение схемы замещения – формализованной линейной модели исследуемой системы в сосредоточенных параметрах, на втором этапе – использование пакета прикладных программ *PGS* /4/. Пакет позволит проводить расчет переходных процессов, расчет границы области устойчивости по двум параметрам, расчет частотных характеристик. При использовании прикладной теории цепей разнохарактерные процессы в агрегатах ПГС описываются формализованными моделями – схемами замещения. Схемы замещения состоят из частей-цепей (гидравлических, пневматических, механических, тепловых, электрических) с различными физическими переменными. Компонентный состав схем замещения определяется библиотекой компонент (таблица). Вид компоненты и ее код определяют математическую зависимость между ее параллельной  $A$  (давление, напряжение, скорость, температура) и последовательной  $B$  (расход, ток, сила или момент сил, тепловой поток) переменными, одинаково справедливыми для цепей любой физической природы. На базе предложенной библиотеки были разработаны формализованные модели основных агрегатов и устройств ПГС: газовой турбины, однокомпонентного и двухкомпонентного газогенераторов, гидрولينий, газовода, пневматического и гидравлического дросселей, центробежного насоса, гидромеханических регуляторов /2, 3/. Построение схемы замещения исследуемой системы сводится к объединению согласно функциональной схеме формализованных моделей отдельных агрегатов и устройств, входящих в состав ПГС.

При моделировании ПГС, в состав которых входят теплообменники,

Библиотека компонент схем замещения

Тип	Код	Уравнение	Обозначение
I	Y	$B_i = 0$	
	C	$\delta_i = C S A_i$	
	R	$A_i = R B_i$	
	L	$A_i = L S B_i$	
	Z	$A_i = 0$	
II	A	$A_i = f(t)$	
	B	$B_i = f(t)$	
III	D	$A_i = a s A_j$	
		$A_i = L s B_j$	
III	F	$B_i = C s A_j$	
		$B_i = \beta s B_j$	
III	F	$A_i = a A_j$	
		$A_i = z B_j$	
III	F	$B_i = g A_j$	
		$B_i = \beta B_j$	
IV	NT	$A_i(t) = A_j(t - \tau)$ $B_i(t) = B_j(t - \tau)$	

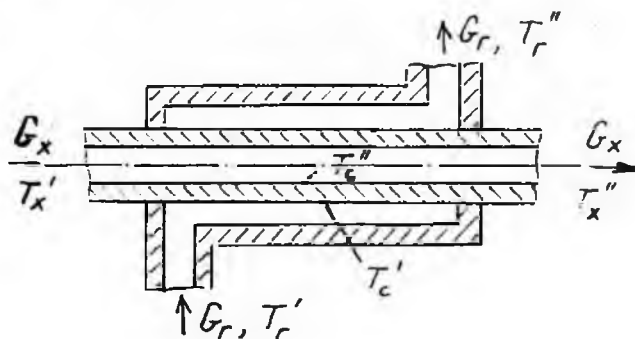
необходимо учитывать динамику теплообменника. Для исследования таких систем с использованием автоматизированного метода (пакета *PGS*) необходимо разработать схему замещения теплообменника.

При разработке схемы замещения теплообменника предполагается, как и в работах /5, 6/, что если отношение значений температур теплоносителей на входе и выходе аппарата не превышает двух, то можно пользоваться при оценке физических свойств теплового потока

средними значениями температур по длине теплообменника. При изменении температуры в более широких пределах целесообразно разбить теплообменник на несколько участков по длине и оценить среднюю температуру в пределах каждого из них.

Методика разработки схемы замещения рассмотрена на примере прямоточного теплообменника (рис. I). При записи исходной математической модели полагается, что в пределах выбранного участка по длине теплообменника справедливы следующие допущения. Теплообмен с окружающей средой отсутствует. Теплоемкость стенки сосредоточена в ее середине, стенка однородная и плоская, коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda$  - величина постоянная. Площадь поверхности теплообмена со стороны обоих теплоносителей одинакова. Температура  $T$  теплоносителей и разделяющей их стенки определяется среднеарифметическими выражениями:

$$T_r = (T_r' + T_r'')/2; \quad T_x = (T_x' + T_x'')/2; \quad T_c = (T_c' + T_c'')/2. \quad (I)$$



Р и с. I. Прямоточный теплообменник

Здесь и в дальнейшем индекс " ' " относится к величинам на входе, индекс " " - к величинам на выходе теплообменника; индекс " x " определяет переменные, характеризующие холодный теплоноситель, индекс " r " - горячий теплоноситель, индекс " c " - переменные, характеризующие стенку. Динамические факторы в работе теплообменника представлены тепловой инерционностью обоих теплоносителей и разделяющей их стенки:

$$C_r \frac{dT_r}{dt} = q_r - q'_c; \quad C_c \frac{dT_c}{dt} = q'_c - q''_c;$$

(2)

$$C_x \frac{dT_x}{dt} = q''_c - q_x;$$

де

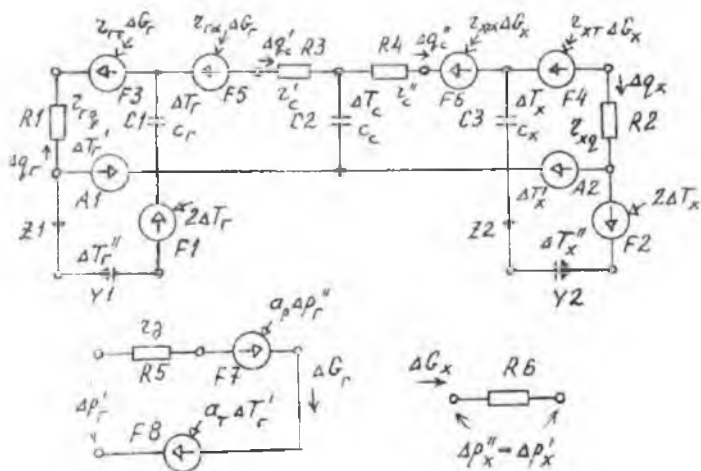
$$q_r = 2G_r C_{pr} (T'_r - T_r); \quad q_x = 2G_x C_{px} (T_x - T''_x);$$

$$q'_c = \alpha_c F (T_r - T'_c) = \frac{2\lambda F}{\delta} (T'_c - T_c);$$

$$q''_c = \alpha_x F (T_c - T_x) = \frac{2\lambda F}{\delta} (T_c - T''_x);$$

$q$  - тепловой поток;  $G$  - расход теплоносителя;  $C_{pr}$ ,  $C_{px}$ ,  $C_{pc}$  - удельные теплоемкости;  $C_r = C_{pr} m_r$ ,  $C_x = C_{px} m_x$ ,  $C_c = C_{pc} m_c$  - тепловые емкости;  $m$  - масса теплоносителя, находящегося в теплообменнике;  $\delta$  - толщина стенки.

Линеаризация систем уравнений (1) и (2) и проведение преобразования позволяют записать линейную динамическую модель теплообменника в виде систем контурных и узловых уравнений, которой соответствует схема замещения, представленная на рис. 2:



Р и с. 2. Схема замещения теплообменника

$$\Delta T_c = T_{c2} - T_{c1} = T_{c2} - T_{c1} = \Delta T_c$$

$$\Delta T_r = T_{r1} - T_{r2} = T_{r1} - T_{r2} = \Delta T_r$$

$$\Delta T_c = T_{c2} - T_{c1} = T_{c2} - T_{c1} = \Delta T_c$$

$$\Delta T_c - \Delta T_r = T_{c2} - T_{r2} = T_{c2} - T_{r2} = \Delta T_c - \Delta T_r$$

$$\Delta T_c - \Delta T_r = T_{c2} - T_{r2} = T_{c2} - T_{r2} = \Delta T_c - \Delta T_r$$

$$\Delta G_c - \Delta G_r = C_c \frac{dT_c}{dt}, \quad \Delta G_r - \Delta G_c = C_r \frac{dT_r}{dt}$$

$$\Delta G_c - \Delta G_r = C_c \frac{dT_c}{dt}$$

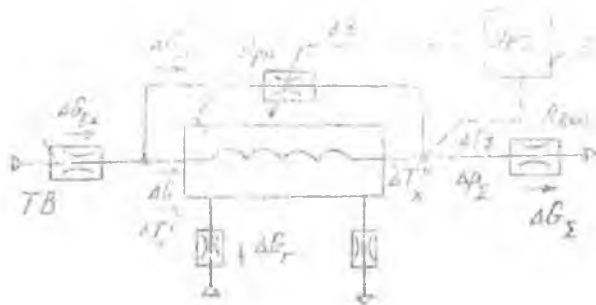
$$Z_{r1} = \frac{1}{2G_r C_{pr}}, \quad Z_{r2} = \frac{1}{2G_r C_{pr}}, \quad Z_{rT} = \frac{T_r' - T_r''}{2G_r}$$

$$Z_{xT} = \frac{T_x - T_x'}{2G_x}, \quad Z_{r\alpha} = \frac{q_c}{\alpha_r^2 F dG_r}, \quad Z_{r\alpha} = \frac{q_c}{\alpha_r^2 F dG_x}$$

$$Z_c' = \frac{\delta}{2\lambda F} + \frac{1}{\alpha_r F}, \quad Z_c'' = \frac{\delta}{2\lambda F} + \frac{1}{\alpha_x F}$$

Тепловая цепь (см. рис. 2), моделирующая динамику теплообменника, содержит емкостные компоненты  $C1, C2, C3$ , резистивные компоненты  $R1, R2, R3, R4$ , определяющие соответственно тепловую инерционность и тепловое сопротивление теплоносителей и разделяющей стенки. В цепь включены компоненты  $F3, F4, F5, F6$ , определяющие зависимость температуры теплоносителей от расходов теплоносителей. Для формирования средних температур теплоносителей в цепь включены короткозамкнутые  $Z1, Z2$  и разомкнутые  $Y1, Y2$  компоненты. Кроме рассмотренной тепловой цепи в схему замещения теплообменника входит гидравлическая цепь для холодного теплоносителя и пневматическая цепь для горячего теплоносителя. Эти цепи учитывают потери давления теплоносителей при прохождении их через теплообменник.

На рис. 3 показана принципиальная схема системы регулирования давления, в состав которой входит теплообменник. Там же приведены обозначения основных переменных. Холодный теплоноситель с расходом

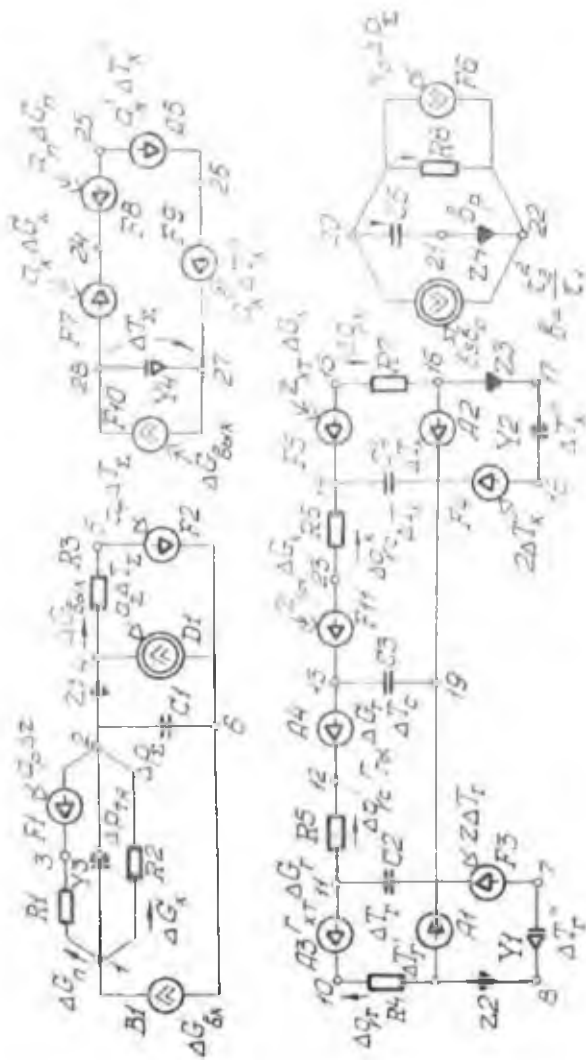


Р и с. 3. Система регулирования давления с теплообменником

Газ через трубку Вентури подается в теплообменник 2 ( $\Delta G_X$ ), часть газового потока поступает в линию перепуска ( $\Delta G_n$ ). На выходе схемы стоит "критический" дроссель  $R_{свх}$ . Регулирование давления  $\Delta D_\Sigma$  за теплообменником осуществляется регулятором давления 3. Регулятор, изменяя площадь проходного сечения  $F_n$  дросселя  $R_{pn}$  в линии перепуска, изменяет и расход газа в теплообменнике. Перепад давления на теплообменнике менее 10% от давления на входе, изменение температуры теплоносителей по длине теплообменника менее, чем в два раза. Расход горячего теплоносителя  $\Delta G_T$  стабилизирован.

Для определения динамических характеристик системы регулирования с помощью пакета прикладных программ *PGS* была построена система замещения (рис. 4). Гидрогазгидравлическая цепь (узлы 1-5-6) описывает модель линии перепуска, гидравлическую цепь теплообменника, газовада за теплообменником и пневматического дросселя  $R_{свх}$ . В цепь линии перепуска включена компонента  $F_n$ , определяющая зависимость площади проходного сечения дросселя от координаты регулятора. Температура газа  $\Delta T_\Sigma$  за теплообменником формируется тепловой цепью (узлы 20-25-27), соответствующей уравнению баланса тепла за теплообменником в точке смешения (тепловая инерционность газа здесь не учитывается). Тепловая цепь (узлы 7-13-18) соответствует цепи теплообменника. Формализованная цепь (узлы 20-22) определяет регулятор давления.

Для использования пакета прикладных программ *PGS* составлены исходные данные - программа пользователя, описывающая на простом и удобном для пользователя (не программиста) языке схему замещения и задание на анализ.



Р и с. 4. Схема замещения системы регулирования давления с температурной компенсацией

Таким образом, на примере показана методика автоматизированного моделирования динамики линейной ПГС с теплообменником в сосредоточенных параметрах. Аналогичным образом может быть составлена схема замещения любых других ПГС с теплообменниками и проведены расчеты динамических характеристик с помощью пакета прикладных программ *PGS*.

#### Библиографический список

1. Бердников В.В. Прикладная теория гидравлических цепей. М.: Машиностроение, 1977. - 192 с.
2. Ашихмин Р.П., Бердников В.В., Тогулева Т.П. Автоматизация исследований пневмогидравлических систем летательных аппаратов // Исследование и выбор определяющих параметров систем механического оборудования летательных аппаратов. - М.: МАИ, 1980. - С. 27-37.
3. Разработка элементов системы автоматизированного проектирования пневмогидравлических схем /Бердников В.В., Тогулева Т.П., Ашихмин Р.П., Эдельштейн М.А. // Пневматика и гидравлика. - М.: Машиностроение, 1984. Вып. 10. - С. 89-97.
4. Пакет прикладных программ для расчета динамики пневмогидравлических систем питания /Бердников В.В., Тогулева Т.П., Ашихмин Р.П., Богодяленская Е.Е. - Деп. в ЦНТИ ГА. Библиографический указатель ВИНТИ "Депонированные научные работы" № 9, 1986. - 103 с.
5. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 223 с.
6. Берман С.С. Расчет теплообменных аппаратов турбоустановок. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 240 с.

УДК 621.45.00.11.018.3

В.А.Бужин, А.А.Мишуков, Е.В.Степанов

СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ДЛЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЧАСТОТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ САР ГТД  
С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЛЕЙНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПУЛЬСАТОРА

Обозначения

- $\omega_{зд}$  - частота вращения ротора высокого давления;  
 $\omega_{нд}$  - частота вращения ротора низкого давления;