

обеспечивающих заданные нагрузки и скорости, и выбор из них гидроцилиндра с меньшим *ср*.

#### Библиографический список

1. Цуханова Е.А. К исследованию гидросистем машин с учетом сжимаемости рабочей среды //Теория пневмо- и гидропривода: Сб. тр. М., 1969. С. 233-240.
2. Гуревич Ю.Я. Динамика гидравлических механизмов //Сборник научно-методических статей по ТММ. М.: 1984. Вып. 10. С. 9-22.
3. Бердников В.В. Прикладная теория гидравлических цепей. М.: Машиностроение, 1977. 192 с.
4. Мамонтов М.А. Теория аналогичности. М.: Машиностроение, 1968. 68 с.
5. Основы автоматического регулирования /Под ред. В.В.Солодовникова. М.: ГИТИЛ, 1954. Т. I. 1116 с.
6. Бердников В.В., Якупова И.П. Математическое моделирование механизмов шасси самолета //Пневматика и гидравлика: Сб. тр. М.: Машиностроение, 1990. Вып. 15. С. 40-51.

УДК 62-82-53.001.573

Г.Т.Гроссшмидт, Я.А.Пахапьяль

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЦЕПИ ПО МОДУЛЬНОМУ ПРИНЦИПУ  
С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРОГРАММ

Описываются принципы построения пакета программ для расчета стационарных и переходных характеристик гидравлических цепей. Приводится описание отдельных модулей пакета. Рассматривается пример расчета переходной характеристики сложной гидравлической цепи.

---

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

---

Гидравлические цепи предназначены для передачи энергии или сигналов посредством жидкости. Ввиду упругости и инерционности жидкости в гидравлических цепях возникают колебания, ввиду вязкости жидкости и изменения условий течения жидкости имеются потери энергии. Гидравлические цепи оказывают определяющее влияние на динамику гидравлических приводов. В них могут возникнуть недопустимо высокие всплески давления. В гидравлических информационных цепях происходит искажение передаваемых по ним сигналов.

Расчет переходных характеристик гидравлических цепей с помощью пакета программ, имеющего в своем распоряжении базу знаний в виде вычислительных моделей элементов и обеспечивающего автоматический синтез рабочей программы, освобождает исследователя от необходимости составления и отладки программ [1, 2]. В качестве первого шага требуется составить блок-схему из многополюсных элементов цепи [3]. При выборе форм многополюсных моделей элементов исходят из требуемых входных и выходных переменных цепей. При этом в распоряжении имеется таблица возможных форм моделей элементов. Как правило, для расчета стационарного и переходного процесса необходимо использовать различные блок-схемы. Для решения необходимо ввести в ЭВМ описание и постановку задачи. С этой целью требуется указать наименование модулей, задать численные значения параметров, описать связи между модулями, задать возмущение и шаг расчета во времени, указать рассчитываемые переменные и условия вывода. На основе этой исходной информации система программирования СИПРИЗ осуществляет автоматический синтез рабочей программы. Пакет программ, построенный по приведенным принципам, реализован на микроЭВМ, имеющей операционную систему БИКС или MS-DOS. Вычислительные модели написаны на языке Си. Программные модули оформлены на входном языке системы СИПРИЗ. На этом же языке происходит описание и постановка задачи.

В пакете программ используются следующие модули: *LIQUID* (жидкость), *TUBE* (труба), *RESISTOR* (гидравлическое местное сопротивление), *CAPACITANCE* (объемная упругость жидкости), *INTERFACE ELEMENT* (соединительный элемент), *NOISE* (возмущение), *DISPLAY* (графический вывод на экран дисплея).

Модуль *LIQUID* (жидкость). Предусматривает использование величин показателей физических свойств жидкости  $\rho$  (плотность),  $\beta_m$  (коэффициент объемной сжимаемости смеси жидкости с воздухом) и  $\nu$  (кинематическая вязкость) на каждом шаге расчета в зависимости от давления при постоянной температуре. В модуле в настоящее время

мя имеется 15 жидкостей, для которых таблично заданы плотность  $\rho$  при  $t = 15^\circ\text{C}$  и кинематическая вязкость  $\nu$ , при различных температурах с шагом в  $10^\circ\text{C}$  в диапазоне  $-60\dots+60^\circ\text{C}$ .

Пример описания жидкости:

AMG 10 Liquid type = 'AMG-10' Theta = 50 air = 0,02,

где AMG 10 - идентификатор, Liquid - наименование модуля, type - марка жидкости, Theta - температура жидкости, air - относительное содержание нерастворенного воздуха.

Модуль TUBE (труба). В математических моделях трубы с сосредоточенными параметрами в уравнениях динамики используются члены, учитывающие сосредоточенные гидравлическое сопротивление  $R$ , инерционность  $L$  и сжимаемость  $C$  жидкости. В уравнениях используются одновременно гидравлические сопротивления, учитывающие как линейную, так и квадратичную потерю напора. Это позволяет иметь универсальные уравнения как для ламинарного, так и для турбулентного течения жидкости. Дополнительно в моделях учитываются местные гидравлические сопротивления, которые непосредственно связаны с трубой (изгибы трубы, соединения трубы, угольники, входы в емкость, выходы из емкости и др.). Введен учет изменения гидравлического линейного и квадратичного сопротивления, а также инерционного сопротивления в зависимости от приращения объемного расхода. Для коррекции этих членов динамического сопротивления согласно экспериментальным данным введены соответствующие коэффициенты.

В зависимости от входных и выходных переменных математические модели труб могут быть представлены четырехполюсниками формы  $H, G, Y$  и  $Z$  [1]. Предлагаются математические модели трубы с сосредоточенными параметрами, различные варианты которых должны выбираться в зависимости от требуемой частоты собственных колебаний  $f$ , от длины трубы  $l$ , а также от требуемой формы четырехполюсной модели (табл. I).

Четырехполюсные модели формы  $HA, GA$  и  $YA$  учитывают только сопротивление  $R$ , а форма  $ZA$  учитывает только объемную упругость  $C$ . Модель формы  $H$  имеет структуру  $C-R-L$ , модель формы  $G$  структуру  $L-R-C$ , модель формы  $Y$  структуру  $L/2-R/2-C-R/2-L/2$  и модель формы  $Z$  структуру  $C/2-R-L-C/2$ .

С помощью коэффициента  $k$ , который для форм  $H$  и  $G$  четырехполюсной модели равняется  $k = (2/\pi)^{1/n}$ , где  $n$  - количество стыкуемых

Т а б л и ц а 1

Четырехполюсные формы моделей TUBE (трубы с сосредоточенными параметрами) и области их применения

Четырехполюсная форма модели	Области применения					
	Стационар- ный процесс	$f \leq \text{IC П}$	для жестких труб			
			$l \leq 250/f$	$l \leq 500/f$	$l \leq 1000/f$	$l \leq 1500/f$
			для гибких шлангов			
	$l \leq 200/f$	$l \leq 400/f$	$l \leq 800/f$	$l \leq 1200/f$		
Обозначение формы модели						
H	HA	H	2ZY	4ZY	6ZY	
G	GA	G	2YZ	4YZ	6YZ	
Y	YA	Y		3ZY		
Z	-	ZA	Z	3ZY		

одинаковых участков трубы, происходит коррекция величин  $L$  и  $C$ , с тем чтобы обеспечить соответствие частоты собственных колебаний трубы с сосредоточенными параметрами с частотой собственных колебаний трубы с распределенными параметрами. В формах  $Y$  и  $Z$  четырехполюсной модели необходимо для корректировки частоты собственных колебаний использовать коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ :  $k_1 = (2/\pi)^{1/2}$  и  $k_2 = (2/\pi)^{1/2}$ . Для формы  $Y$  четырехполюсной модели необходимо вводить корректировки в виде  $k_1 L$  и  $k_2 C$ , а для формы  $Z$  четырехполюсной модели - корректировки в виде  $k_1 C$  и  $k_2 L$ .

Для жесткой трубы длиной  $l \leq 500/f$  модель четырехполюсной формы  $H$  получается с использованием двух элементов с моделями формы  $Z$  и  $Y$  последовательно (модель  $2ZY$ ), а модель четырехполюсной формы  $G$  - с использованием элементов с моделями  $Y$  и  $Z$  последовательно (модель  $2YZ$ ). Для жесткой труб длиной  $l \leq 1000/f$  и  $l \leq 1500/f$  находят применение модели, отдельные четырехполюсные формы которых получают объединением большего количества моделей формы  $Y$  и  $Z$  (модели  $3ZY, 3YZ, 4ZY, 4YZ, 6ZY, 6YZ$ ). В слу-

чае более длинных труб необходимо использовать еще большее количество элементов формы  $Y$  и  $Z$  последовательно, или модели труб с распределенными параметрами.

В табл. I не включены варианты объединения моделей четырехполосной формы  $H$  и  $G$  для расчета переходных характеристик, поскольку ввиду несимметричности моделей при их стыковке наблюдается повышение амплитуды колебаний. Также в этом случае не выявляются высшие гармоники. Поскольку четырехполосная форма  $Z$  не имеет стационарных зависимостей, то блок-схемы стационарного течения следует строить в отдельности с использованием только четырехполосных форм  $HA$ ,  $GA$  и  $YA$  или  $H$ ,  $G$  и  $Y$ .

Пример описания трубы:

$t1\ tubeH\ fluid=AMG10\ s=0,2e-2\ l=1\ d=0,01\ AL=75\ E=2,1eH$   
 $\lambda=0,04\ dzeta=2\ nc=1\ coefrl=1,2\ coefrt=1,5\ coefl=0,1$   
 $q\ 1, s=500e-6,$

где  $t1$  - идентификатор,  $tubeH$  - наименование модуля,  $fluid$  - задание жидкости,  $s$  - толщина стенки трубы,  $d$  - внутренний диаметр трубы,  $AL$  - коэффициент гидравлического трения ламинарного течения,  $E$  - модуль упругости материала труб,  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения турбулентного течения,  $dzeta$  - коэффициент местного сопротивления,  $nc$  - количество одинаковых стыкуемых труб,  $coefrl$ ,  $coefrt$ ,  $coefl$  - коэффициенты корректировки динамического линейного, квадратичного и инерционного сопротивления,  $q\ 1, s$  - постоянный объемный расход на левом конце трубы.

Модель RESISTOR (гидравлическое местное сопротивление). Модели гидравлического местного сопротивления могут быть представлены в четырехполосной форме  $H$ ,  $G$  и  $Y$ . Гидравлические местные сопротивления могут быть описаны линейным  $R_L$ , квадратичным  $R_T$  и инерционным сопротивлением  $L$ . Таким образом уравнения для всех гидравлических местных сопротивлений могут быть приняты одинаковыми, в них величины  $R_L$ ,  $R_T$  и  $L$  различны для каждого конкретного местного сопротивления. Перечень имеющихся в пакете в распоряжении гидравлических местных сопротивлений приведен в табл. 2.

Таблица 2

Модели модуля *RESISTOR* (гидравлическое местное сопротивление)

Обозначение модели	Наименование	Параметры
<i>rra</i>	Круглый канал	$d, L, A_L, \lambda, \xi$
<i>rrb</i>	Осевая круговая щель	$d, L, \delta, K_E$
<i>rrc</i>	Круглое отверстие в диафрагме	$d, L, \mu$
<i>rrd</i>	Круглое отверстие в диафрагме с насыщением	$d, L, \mu, Q_{SAT}$
<i>rre</i>	Ряд последовательно расположенных круглых каналов	$d_i, L_i, A_{L_i}, \lambda_i, \xi_i$
<i>rrfa</i>	Внезапное сужение трубы	$d, D, Q$
<i>rrfb</i>	Внезапное расширение трубы	$d, D, Q$
<i>rrfc</i>	Плавный поворот трубы	$d, D, \varphi, Q$
<i>rrfd</i>	Крутой поворот на $90^\circ$ трубы	$d, Q$
<i>rrfe</i>	Вход в трубу, выход из трубы, штуцер, переходник и др.	$d, \xi$
<i>rrg</i>	Гидравлический дроссель	$A, L, \mu$
<i>rrh</i>	Гидравлический дроссель с насыщением	$A, L, \mu, Q_{SAT}$
<i>rri</i>	Гидрораспределитель	$d_o, Q_N, \Delta P_N$
<i>rrj</i>	Гидроустройство с квадратичным сопротивлением	$Q_N, \Delta P_N$
<i>rrk</i>	Гидроустройство с линейным сопротивлением	$Q_N, \Delta P_N, \gamma_N, \rho_N$

Используемые в табл. 2 условные обозначения:  $A$  - площадь проходного сечения,  $A_L$  - коэффициент гидравлического трения ламинарного течения,  $d$  - диаметр,  $d_o$  - условный диаметр,  $D$  - больший диаметр,  $K_E$  - коэффициент эксцентриситетности круговой щели,  $L$  - длина,  $P_N$  - номинальный перепад давления,  $Q$  - объемный расход,

$Q_N$  - номинальный объемный расход,  $Q_{SAT}$  - объемный расход насыщения,  $r$  - радиус изгиба трубы,  $\xi(\text{dzeta})$  - коэффициент местного сопротивления,  $\lambda(\text{lambda})$  - коэффициент гидравлического трения турбулентного течения,  $\mu(\text{mu})$  - коэффициент расхода,  $\nu(\text{nu})$  - кинематическая вязкость жидкости,  $\rho_N(\text{rho})$  - номинальная плотность жидкости,  $\varphi(\text{fi})$  - угол изгиба трубы.

Модуль CAPACITANCE (объемная упругость жидкости). В качестве математических моделей объемной упругости жидкости используются модели труб  $ZA$ ,  $H$ ,  $G$  и  $Z$ . Модель труб  $ZA$  учитывает только объемную упругость  $C$ . Моделями  $H$ ,  $G$  и  $Z$  учитываются также гидравлическое сопротивление и инерционность жидкости.

Модуль INTERFACE ELEMENT (соединительный элемент). В качестве соединительного элемента в пакете в распоряжении имеется тройник. Математические модели тройника выражают условие неразрывности потока и условия изменения давлений в местных сопротивлениях тройника. Имеется шесть вариантов модели тройника. Коэффициенты местного гидравлического сопротивления в тройнике определяются в зависимости от знака объемных расходов.

Модуль NOISE (возмущение). Имеются в распоряжении возмущения "jump" (скачкообразное), "sinus" (синусоидальное), "rectangle" (прямоугольное) и "imp" (импульсное).

Пример задания возмущения:

```
dp noise type = 'jump' media = 50e5 delta = 5e5
deltat = 0,001 result = t1,p2.s,
```

где  $dp$  - идентификатор,  $noise$  - наименование модуля,  $type$  - характер возмущения,  $media$  - значение переменного до возмущения,  $delta$  - скачок переменного,  $deltat$  - продолжительность скачка,  $result$  - наименование возмущаемого переменного.

Возмущения могут быть приложены одновременно ко всем входам. Каждому входу могут быть также заданы одновременно несколько возмущений.

Модуль DISPLAY (графический вывод на экран дисплея). Данный модуль организует ход выполнения расчета и графический вывод переконного процесса на экран дисплея.

Пример задания вывода:

$d$  display eps =  $1e-5$  time = 0,02 step = 0,00005 res = tl.pl.s,  
где  $d$  - идентификатор, display - наименование модуля, eps - допускаемая относительная погрешность расчета на уровне согласования межмодульных переменных, time - продолжительность рассчитываемого переходного процесса, step - шаг расчета во времени, res - рассчитываемое переменное.

Одновременно будут рассчитаны стационарные значения и переходные процессы всех переменных. В задании требуется указать переменные, значения и процессы которых мы хотим вывести на экран дисплея.

Пример расчета. Расчет переходных процессов на уровне модулей для труб и местных объемных упругостей жидкости выполняется стандартным методом Рунге-Кутты. Для гидравлических местных сопротивлений используется итерационный метод Ньютона. Объединение межмодульных переменных происходит с помощью специальной итерационной процедуры. Если для одного периода колебаний рассчитывается не менее 100 точек, то для объединения модулей требуется, как правило, не более двух итераций.

В качестве примера рассматривается расчет переходного процесса в гидравлической цепи, состоящей из участков трубы с разветвлением, с включенными в цепь местными гидравлическими сопротивлениями (рис. 1, а). Блок-схема модели цепи для расчета стационарного процесса составлена из четырехполюсных элементов формы  $H, G$  и  $Y$  (рис. 1, б), а блок-схема модели для расчета переходных процессов - из четырехполюсных элементов формы  $Y$  и  $Z$  (рис. 1, в).

Исходные данные следующие:

Жидкость: type = 'IGP-18' Theta = 50 air = 0,02

Трубы:  $l = 0.5(t_1, t_2, t_5, t_6)$   $l = 1(t_3, t_4)$   $l = 0,6(t_7, t_8)$

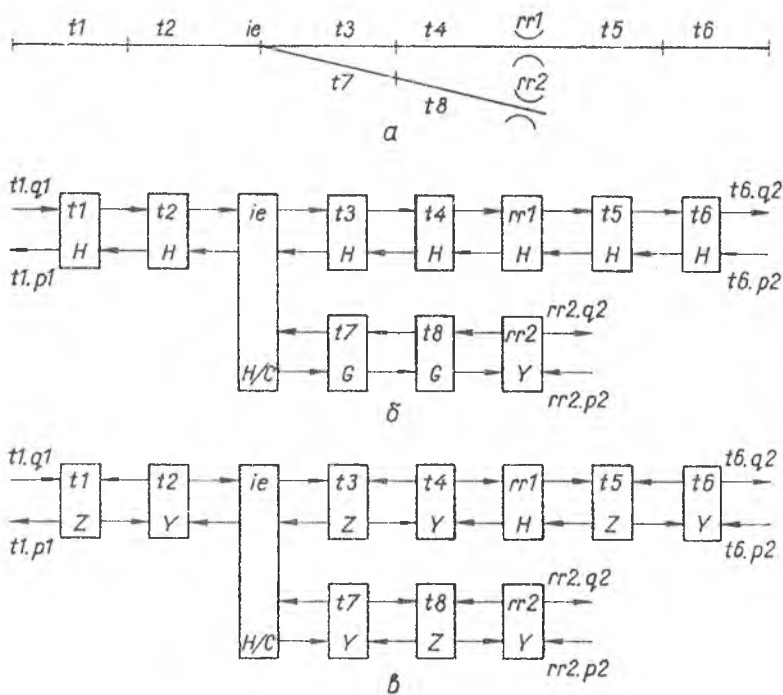
$d = 0,01$   $s = 0,2e-2$   $AL = 75$   $E = 2,1e11$   $dzeta = 2$   $lambda = 0,04$

Местные сопротивления:  $rr1$   $d = 0,01$   $mu = 0,7$   $l = 0,001$

$rr2$   $d = 0,0005$   $mu = 0,7$   $l = 0,001$

Постоянные входы:  $t6.p2 = 50e5$   $rr2.p2 = 10e5$





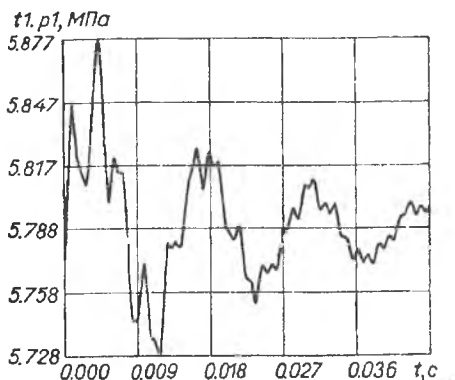
Р и с. 1. Функциональная схема (а), блок-схема из многополюсных элементов для расчета стационарного (б) и переходного (в) процессов гидравлической цепи

Возмущение:  $type = 'jump'$   $media = 500e-6$   $delta = 5e-6$

$deltat = 0,001$   $result = tut.q1.s$

Выход:  $display eps = 1e-5$   $time = 0,045$   $step = 0,00003$   $res = t1.pls$

Расчет выполнялся на ЭЭ-оитовом микроЭВМ, имеющей операционную систему МНИКС. Полученный график переходного процесса давления  $t1.pl$  при входном скачкообразном возмущении объемного расхода  $t1.q1$  приведен на рис. 2. Расчет одной точки занимал 9 секунд. В полученном переходном процессе выявлялась весьма сложная картина колебаний с отдельными высокими пиками давления в начальном участке процесса.



Р и с. 2. Переходный процесс давления  $p_1$  при скачкообразном возмущении объемного расхода  $q_1$  в гидравлической цепи

УДК 629.7.036

В.Е.Годлевский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РДМГ  
С УЧЕТОМ РЕАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Приведена нестационарная одномерная модель камеры сгорания, учитывающая не только динамические свойства системы топливопитания, но и реальную скорость выгорания топлива. Модель реализована в программе *KAMERAL*, предназначенной для моделирования импульсных режимов работы РДМГ.

Библиографический список

1. Гроссшмидт Г.Т. Принципы построения математических моделей гидромеханических цепных систем //Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 632. С. 3-13.
2. Пахапилль Я.А., Гроссшмидт Г.Т. Пакет программ для моделирования гидромеханических систем //Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 632. С. 47-56.
3. *Großschmidt G., Wanaweski J., Pakapill J. Blockschemazusammensetzung der hydromechanischen Systeme aus Mehrpolmodellen der Funktionalelemente. 7. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge - Teil 1, Teil 2, Dresden 1987. DDR, S. 138-146.*