

# Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД

Лебединский Е.В., Зайцев Б.В., Соболев А.А.

125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8.

Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша

Телефон: (095) 456-64-85

Факс: 007-095-456-8228 E-mail: kerc@elnet.msk.ru

## АБСТРАКТ

В работе рассмотрены проблемы, связанные с проектированием и анализом статической и динамической характеристик регулятора расхода ЖРД. Представлены математические модели для:

- 1) определения параметров конструкции регулятора по заданному диапазону регулирования и виду его предполагаемой статической характеристики;
- 2) вычисления статической характеристики, по заданным конструктивным параметрам регулятора;
- 3) оценки динамической характеристики регулятора, и вычисления качества переходного процесса при изменении режимов работы двигателя;
- 4) рассмотрения проблемы взаимодействия между регулятором и двигателем, и в частности, вычисления границы устойчивости в параметрах регулятора.

Приведены конкретные примеры, иллюстрирующие возможности каждой из рассмотренных математических моделей.

## ВВЕДЕНИЕ

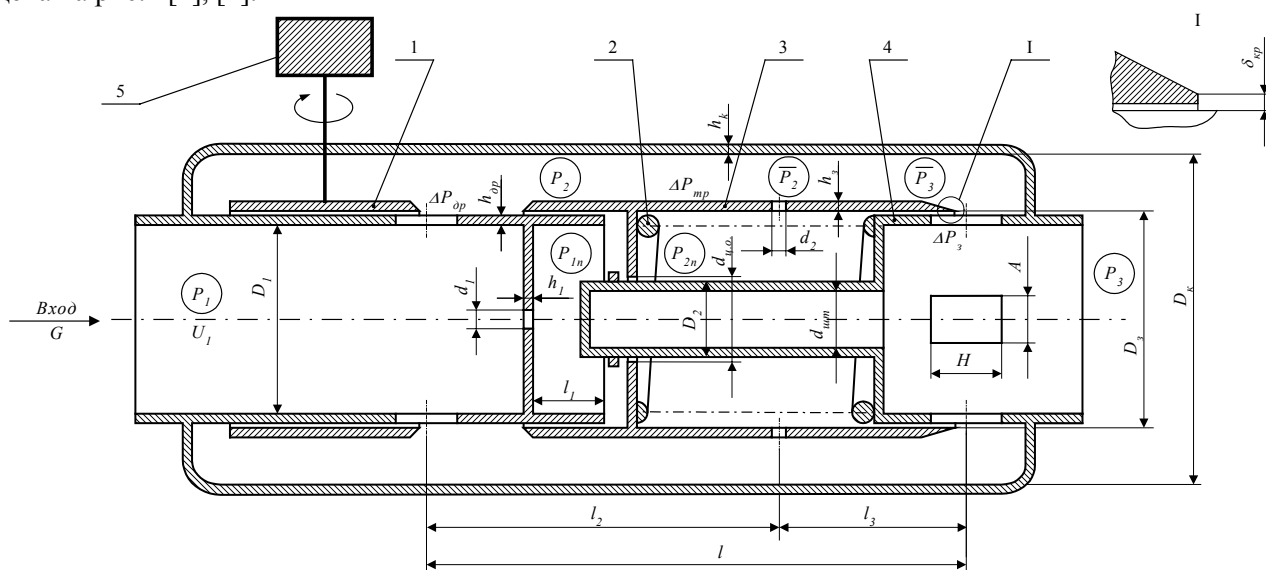
Регулятор расхода – один из основных агрегатов любой схемы ЖРД. В схему двигателя он входит как исполнительный орган системы управления режимами работы двигателя по тяге и соотношению компонентов.

В составе системы управления режимами работы двигателя, регулятор расхода выполняет две функции: программное изменение расхода с одного уровня на другой и автоматическое поддержание нового уровня расхода с заданной точностью.

Значимость этого агрегата для двигателя в целом определяется следующими его свойствами: максимальным возможным уровнем перепадов давлений на нем и его массой.

От первого параметра зависят предельные энергетические возможности двигателя в целом. От второго – динамические характеристики двигателя, в значительной степени определяющие его надежность.

В дальнейшем будет использоваться некоторая обобщенная схема регулятора расхода, которая приведена на рис.1 [1], [2].



1. Дросселирующий элемент; 2. Пружина; 3. Золотник; 4. Направляющая 5. Привод дросселя

Рис. 1

Ее характерная особенность состоит в том, что две основные функции системы управления режимом: настройка и поддержание режима совмещены в одном агрегате. В соответствии с рис.1 дросселирующий элемент 1 управляет настройкой двигателя на заданный расход, а золотник с поршнем 3 в совокупности с пружиной 2 реализует поддержание расхода. Совмещение двух функций: настройки и поддержания режима в одном агрегате позволяет характеризовать схему на рис.1 как многорежимный регулятор расхода прямого действия.

В данной работе речь пойдет о создании программной системы автоматизированного проектирования регулятора расхода и анализа его характеристик. Здесь и далее под проектированием понимается не разработка технологического чертежа регулятора (это дело конструктора), а научно обоснованный выбор его параметров и характеристик.

Представленные в работе математические модели регулятора были ориентированы на использование их в составе более общей программной системы AnaSyn – системе многофункционального компьютерного моделирования ЖРД [3]. По этой причине принципы построения математических моделей задач синтеза и анализа регулятора аналогичны принципам построения математических моделей AnaSyn:

- должен быть реализован так называемый принцип многоуровневого моделирования; когда на каждой фазе работы над проектом двигателя используется отвечающая именно этому уровню проектирования математическая модель регулятора;
- на каждом этапе работы над проектом регулятора у конструктора регулятора должна быть возможность испытать спроектированный им регулятор в составе математической модели всего двигателя (то есть перейти в систему AnaSyn).

## 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА

Общая постановка задачи проектирования звучит так: спроектировать объект (в нашем случае регулятор) с определенными (заранее заданными) свойствами. Текстовое изложение будущих свойств проектируемого объекта и указание цели его создания составляет содержание технических требований (ТТ) на объект проектирования. Если объект проектирования (регулятор) является составной частью более сложной системы (двигателя), то требования к свойствам этого объекта определяются на более высоких иерархических уровнях проектирования. В нашем случае самый верхний уровень проектирования – это уровень проектирования ракеты, на котором определяется диапазон работоспособности двигателя по тяге и соотношению компонентов. Задаются времена перехода двигателя с одного режима на другой. На этом уровне определяются потребная точность поддержания тяги и соотношения компонентов на номинальном режиме. Второй уровень – уровень выбора схемы двигателя и энергетической увязки ее параметров. На этом уровне определяются количество необходимых регуляторов, наиболее эффективное место их расположения. Третий уровень – уровень проектирования основных агрегатов двигателя: камеры сгорания, тракта охлаждения, турбонасосного агрегата. На этом уровне устанавливаются следующие свойства регулятора:

- Номинальный расход через регулятор  $G_n$  (кг/с)
- Номинальный перепад давлений на регуляторе  $\Delta P_n$  (МПа)
- Потребные диапазоны регулирования:  
 $\Delta P_{max}$  - максимальное значение перепада давлений на регуляторе  
 $\Delta P_{min}$  - минимальное значение перепада давлений на регуляторе
- Минимальный и максимальный расходы через регулятор  $G_{min}$  и  $G_{max}$ , если он многорежимный
- Определяется по заданной точности поддержания тяги и соотношения компонентов точность поддержания расхода регулятором на номинальном режиме  $G_n \left( 1 - \frac{\bar{\varepsilon}}{100} \right) \leq G_n \leq G_n \left( 1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{100} \right)$ , где  $\bar{\varepsilon}$  - относительная точность (в процентах)

Четвертый уровень – уровень проектирования регулятора и отладка системы управления двигателем. На этом уровне формируются требования конструктора регулятора к будущему регулятору. Этих требований несколько и связаны они:

1. С видом предполагаемой статической характеристики регулятора, то есть зависимости расхода через регулятор от перепада давлений на нем  $G = f(\Delta P)$ .

На рис.2 показаны возможные виды статической характеристики регулятора для номинального расхода. Идеальный регулятор – это регулятор, который при любых отклонениях перепада давлений от номинального, возвращает расход к его номинальному значению (кривая 1 на рис.2). Такой регулятор называется астатическим. К сожалению, создать астатический регулятор практически невозможно. Поэтому большинство регуляторов обладают статизмом: положительным (кривая 2 на рис.2) или отрицательным (кривая 3 на рис.2).

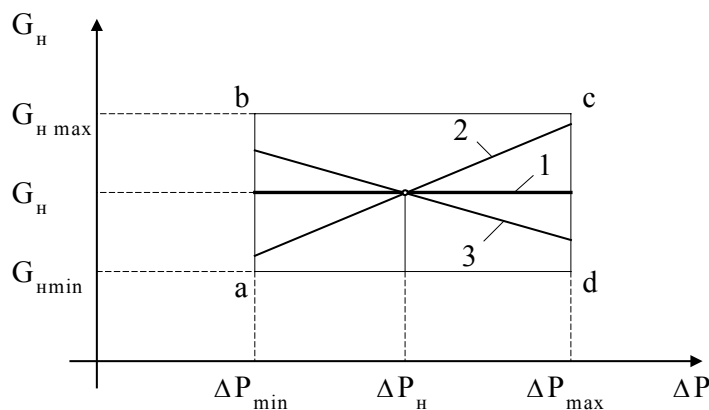


Рис. 2

Статизм регулятора означает, что при отклонении перепада от номинального значения, регулятор не возвращает расход к его номинальному значению, хотя новое значение расхода и лежит в пределах заданной точности. Доказано, что регулятор с отрицательным статизмом может приводить к автоколебательным режимам работы. Поэтому одно из основных требований со стороны конструктора регулятора – требование положительного статизма регулятора.

2. С требованиями исходящими из представления о регуляторе, как динамическом элементе схемы: двигатель плюс регулятор. Эти требования касаются динамических характеристик регулятора. Эти требования обычно формулируются на пятом уровне иерархии – уровне первых испытаний опытного образца, когда двигатель существует в металле. Центральным требованием к регулятору на этом этапе работы является требование устойчивой работы регулятора в составе двигателя и обеспечение необходимого качества переходных процессов, по крайней мере, по регулируемой переменной – расходу.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ РЕГУЛЯТОРА

В данном разделе работы будет решаться задача, как выбрать параметры конструкции приведенной на рис. 1 так, чтобы полученный в итоге регулятор удовлетворял сформулированным выше техническим требованиям (так называемая задача проектирования). Задача проектирования относится к числу не корректных математических задач, то есть задач, не допускающих однозначного решения. В результате решения задачи проектирования определяется не конкретное значение вектора  $\vec{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  конструктивных параметров, а область его возможных

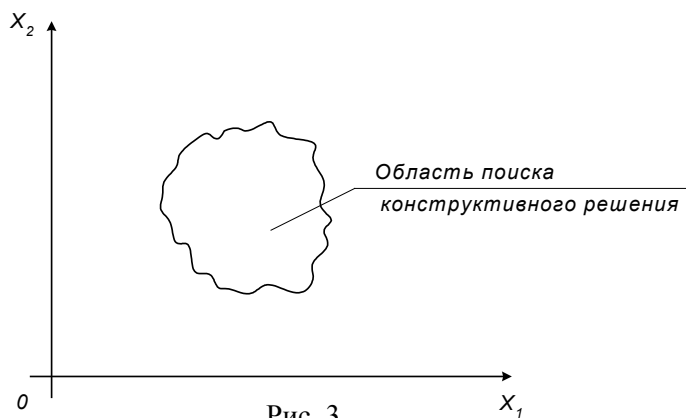


Рис. 3

допустимых значений (см. рис. 3).

Причина сужения области поиска конструктивного решения обусловлена необходимостью рассматривать только те наборы конструктивных параметров, которые удовлетворяют техническим требованиям.

Вместе с тем в очерченной таким образом области поиска конструктивного решения содержатся наборы параметров, которые не приемлемы с физической точки зрения. Исключить из рассмотрения физически неприемлемые решения

возможно, если на этапе проектирования использовать математическую модель функционирования регулятора расхода. Так как регулятор расхода проектируется на установившийся номинальный режим работы двигателя, то на этапе проектирования должна использоваться стационарная математическая модель регулятора.

### 3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА В СТАТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Уравнения статики регулятора включают в свой состав следующие соотношения:

а) Баланс сил на подвижных частях регулятора (золотнике)

$$F_p \cdot \Delta P_{th} + CN_s F_{s.e.} \Delta P_s = T_{spr} + k \cdot x \quad (1)$$

В этом уравнении:

$\Delta P_{th} = (P_1 - P_2)$  - перепад давлений на дросселе

$\Delta P_s = (P_2 - P_3)$  - перепад давлений на золотнике

$T_{spr} = k \cdot x_0$  - начальный затяг пружины, где  $k$  - жесткость пружины

$x$  - смещение поршня от его начального положения

$F_p = \frac{\pi}{4} (D_s^2 - d_{c.o.}^2)$  - площадь поршня

$F_{s.e.} = 2\delta_{s.e.} y_s$  - площадь кромки золотника в пределах золотникового отверстия шириной  $2y_s$

$N_s$  - число золотниковых окон

Вторая сила в уравнении (1) является гидродинамической силой воздействия потока на золотник. Коэффициент гидродинамической силы  $C$  определяется экспериментально.

в) Экспериментальные зависимости связи между перепадом давлений и расходом

$$\Delta P_{th} = \frac{G^2}{2\rho \cdot \mu_{th}^2 \cdot F_{th}^2 \cdot N_{th}^2}; \Delta P_s = \frac{G^2}{2\rho \cdot \mu_s^2 \cdot F_s^2 \cdot N_s^2} \quad (2)$$

где  $\mu_{th}$  - коэффициент расхода дросселя,  $\mu_s$  - коэффициент расхода золотникового отверстия,  $F_{th}$  - площадь отверстия дросселя,  $F_s$  - площадь отверстия золотника,  $N_{th}$  - число дроссельных окон.

с) В техническом задании на проектирование фигурирует суммарный перепад давлений на регуляторе ( $\Delta P$ ). Он складывается из трех величин

$$\Delta P = \Delta P_{th} + \Delta P_s + \Delta P_{fr} \quad (3)$$

где  $\Delta P_{fr}$  - потери давления на трение жидкости о корпус в проточной части регулятора

$$\Delta P_{fr} = \xi \frac{\rho U^2 \cdot \pi D_b \cdot l}{2F_l} = \xi \frac{G^2}{2\rho \cdot F_l^3} \cdot \pi \cdot D_b \cdot l \quad (4)$$

В этом соотношении  $\xi$  - коэффициент потерь на трение,  $D_b$  - диаметр корпуса,  $l$  - длина от середины окна дросселя до середины окна золотника,  $F_l = \frac{\pi}{4} (D_b^2 - (D_s - d_s)^2)$  - площадь поперечного сечения потока жидкости в регуляторе.

д) К приведенным соотношениям добавим геометрические характеристики окон золотника и дросселя. Будем рассматривать две формы окон: прямоугольную (а) и треугольную (б) (см. рис. 4).

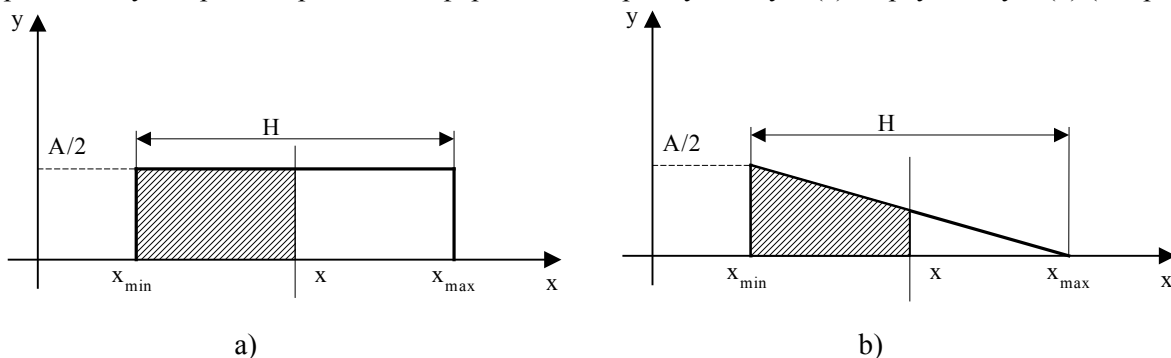


Рис. 4

Каждый тип окна характеризуется двумя параметрами А, Н.  
С учетом рис.3 нетрудно получить следующие выражения для площади проходного сечения ( $x_{\min} = 0$ ;  $x_{\max} = H$ ):

а) прямоугольного окна  $F = A(H - x)$   $y = A/2$

б) треугольного окна  $F = \frac{1}{2} \cdot \frac{A}{H} (H - x)^2$   $y = \frac{A}{2H} (H - x)$

Выведем основные уравнения для расчета статической характеристики регулятора. Подставляя (2) (4) в уравнения (1) и (3) получим:

$$G^2 = \Phi_1(x_s) \quad (5)$$

где 
$$\Phi_1(x_s) = \frac{T_{spr} + k \cdot x_s}{\frac{F_p}{2\rho \cdot \mu_{th}^2 F_{th}^2 N_{th}^2} + \frac{CN_s F_{s.e.}}{2\rho \cdot \mu_s^2 F_s^2 N_s^2}} \quad (6)$$

$$\Delta P = \Phi_2(x_s) \cdot G^2 = \Phi_1(x_s) \cdot \Phi_2(x_s) = \Phi_3(x_s) \quad (7)$$

где 
$$\Phi_2(x_s) = \frac{1}{2\rho \cdot \mu_{th}^2 F_{th}^2 N_{th}^2} + \frac{1}{2\rho \cdot \mu_s^2 F_s^2 N_s^2} + \xi \frac{\pi \cdot D_b l}{2\rho \cdot F_l^3} \quad (8)$$

Соотношения 
$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \Phi_3(x_s) \\ G &= \sqrt{\Phi_1(x_s)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

в параметрическом виде (параметр  $x_s$ ) задают статическую характеристику регулятора

$$G = G(\Delta P) \quad (10)$$

В приведенной ниже таблице 1 содержатся параметры, которые должны быть заданы перед началом проектировочного расчета регулятора.

Входные параметры для проектирования регулятора

Таблица 1

	Название параметра	Значение	Размерность
1.	Входное давление	14.72	МПа
2.	Расход на номинальном режиме	0.670	кг/с
3.	Плотность среды	1140.0	кг/м <sup>3</sup>
4.	Перепад давлений на номинальном режиме	3.490	МПа
5.	Левый статизм регулятора	0.640	кг/с
6.	Правый статизм регулятора	0.680	кг/с
7.	Минимальный перепад давлений на регуляторе	2.050	МПа
8.	Максимальный перепад давлений на регуляторе	4.870	МПа
9.	Номинальный перепад давлений на дросселе	0.420	МПа
10.	Скорость потока на входе	7.500	м/с
11.	Скорость потока в регуляторе	1.900	м/с
12.	Длина корпуса	120.0	мм
13.	Код типа окна дросселя (1-прямоуг.; 2-треуг.)	1	-
14.	Код типа окна золотника (1-прямоуг.; 2-треуг.)	1	-
15.	Количество окон дросселя	1	-
16.	Количество окон золотника	1	-
17.	Поперечный габаритный размер окна дросселя	1.3	мм
18.	Продольный габаритный размер окна дросселя	30.0	мм
19.	Диаметр центрального отверстия	8.7	мм
20.	Толщина кромки золотника	1.0	мм
21.	Коэффициент потерь на трение	7.8	-
22.	Коэффициент расхода дросселя	0.70	-
23.	Коэффициент расхода золотника	0.70	-
24.	Коэффициент гидродинамической силы	0.400	-
25.	Предельное напряжение в материале стенки	191.36	Н/м <sup>2</sup>

26.	Наружный диаметр пружины	10.99	мм
27.	Плотность материала	7850.0	кг/м <sup>3</sup>
28.	Модуль сдвига	78453.2	МПа
29.	Напряжения кручения	578.59	МПа

Перечисленные в таблице 2 параметры конструктор не может задать произвольно, если он хочет получить результат, не противоречащий физическим законам. Они следуют из той модели, которая описана выше.

Результаты проектирования регулятора

Таблица 2

	Название параметра	Значение	Размерность
1.	Поперечный размер окна золотника	1.0	мм
2.	Продольный размер окна золотника	16.9	мм
3.	Диаметр золотника	13.0	мм
4.	Толщина стенки золотника	1.5	мм
5.	Диаметр входной трубы	10.0	мм
6.	Диаметр корпуса	25.5	мм
7.	Толщина стенки корпуса	1.0	мм
8.	Толщина стенки дросселя	1.5	мм
9.	Площадь сечения входной трубы	7.836e-05	м <sup>2</sup>
10.	Жесткость пружины	682.005	Н/м
11.	Начальный затяг пружины	28.495	Н
12.	Начальное положение пружины	41.8	мм
13.	Начальное положение дросселя	6.2	мм
14.	Положение золотника на номинальном режиме	4.8	мм
15.	Положение золотника на максимальном режиме	6.9	мм
16.	Ход золотника вправо	2.2	мм
17.	Ход золотника влево	-4.8	мм

В качестве примера на рис.5(а) приведена статическая характеристика спроектированного по этой методике регулятора на номинале (Н) и в четырех характерных точках квадрата работоспособности двигателя 1, 2, 3, 4 (см. рис.5(б)).

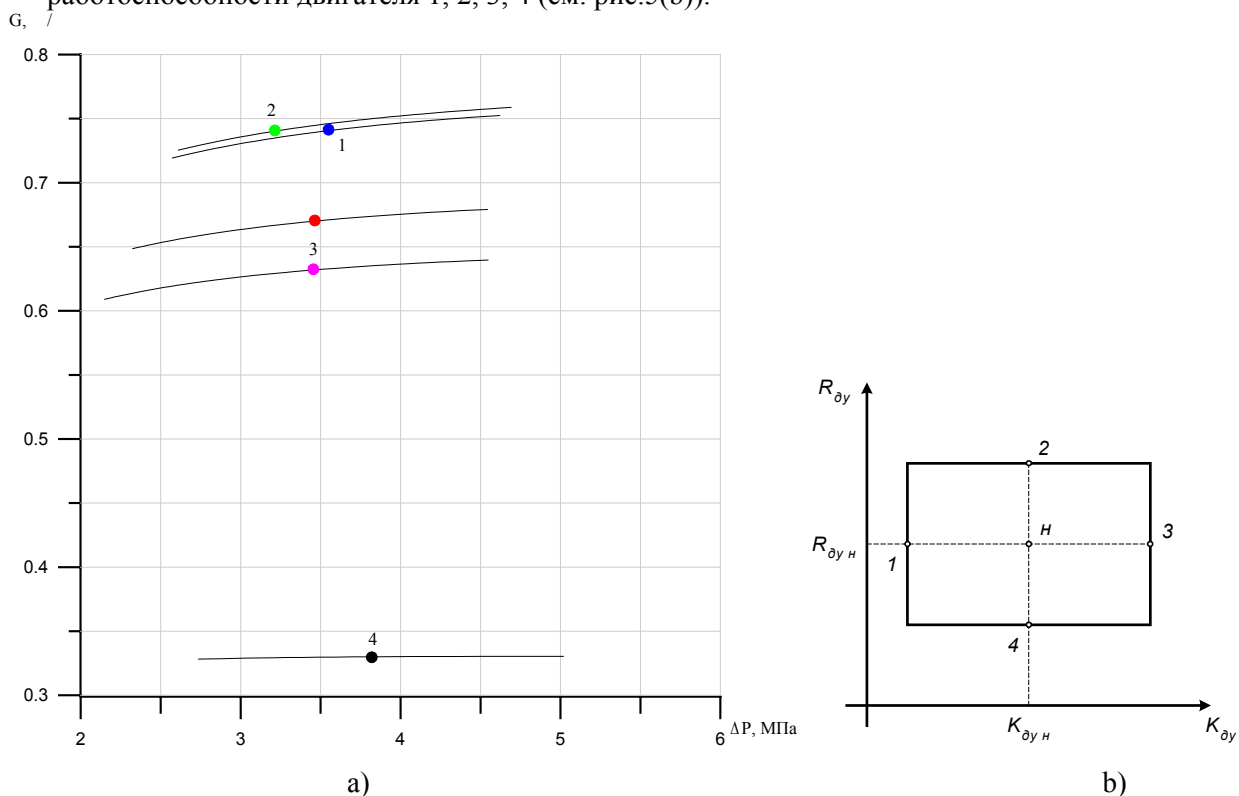


Рис. 5

#### 4. ДИНАМИКА РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА

Рассмотрим основные соотношения, описывающие динамические процессы в регуляторе в следующих допущениях: жидкость несжимаема, утечки жидкости через зазоры между трущимися поверхностями пренебрежимо малы, сухое трение отсутствует, в массу подвижных частей не входит масса пружины, не будем учитывать инерцию жидкости в окнах дросселя и золотника регулятора.

##### 1. Суммарный перепад давлений на регуляторе

$$\Delta P = \Delta P_{th} + \Delta P_{fr2} + \Delta P_{fr3} + \Delta P_3 \quad (11)$$

В этом соотношении

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{th} &= P_1 - P_2 & \Delta P_3 &= \overline{P_2} - P_3 \\ \Delta P_{fr2} &= P_2 - \overline{P_2} & \Delta P_{fr3} &= \overline{P_2} - \overline{P_3} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

##### 2. Закон сохранения массы

$$G_1 = G_2 + g_1 \quad (13)$$

В этом соотношении  $G_1$  – расход на входе в регулятор,  $G_2$  – расход через дроссель,

$g_1 = \rho \cdot F_1 U_1$  – расход через жиклеры 1

$$G_3 = G_2 + g_2 \quad (14)$$

где

$G_3$  – расход через золотник,

$g_2 = \rho \cdot F_2 U_2$  – расход через жиклеры 2

Так как жидкость несжимаемая, то

$$g_1 = g_2 = g \quad (15)$$

и

$$G_1 = G_3 = G \text{ – расход через регулятор} \quad (16)$$

##### 3. Эмпирические законы сопротивления на дросселе, золотнике и жиклерах

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta P_{th}} &= \text{sign } G_2 \cdot B_{th} \cdot G_2^2 \\ B_{th} &= \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \mu_{th}^2 \cdot F_{th}^2 \cdot N_{th}^2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta P_3} &= \text{sign } G_3 \cdot B_3 \cdot G_3^2 \\ B_3 &= \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \mu_s^2 \cdot F_s^2 \cdot N_s^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta P_1} &= \text{sign } g_1 \cdot B_1 \cdot g_1^2 \\ B_1 &= \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \mu_1^2 \cdot F_1^2 \cdot N_1^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta P_2} &= \text{sign } g_2 \cdot B_2 \cdot g_2^2 \\ B_2 &= \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \mu_2^2 \cdot F_2^2 \cdot N_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В этих соотношениях

$\mu_{th}$  – коэффициент расхода дросселя,  $\mu_1$  – коэффициент расхода жиклера 1,

$\mu_2$  – коэффициент расхода жиклера 2,  $\mu_s$  – коэффициент расхода золотника,

$$F_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ (м}^2\text{)}, \quad F_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \text{ (м}^2\text{)},$$

$sign G$  – знак расхода  $G$ ,  $sign g$  – знак расхода  $g$ .

4. Эмпирический закон сопротивления в тракте регулятора

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta P_{fr2}} &= sign G_2 \cdot B_{fr} \cdot G_2^2 \cdot \frac{l_2}{l} \\ \overline{\Delta P_{fr3}} &= sign G_3 \cdot B_{fr} \cdot G_3^2 \cdot \frac{l_3}{l}; \quad B_{fr} = \frac{\xi \cdot D_b \cdot l}{2 \cdot \rho \cdot F_l^3} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

5. Закон сохранения массы жидкости в полости перед поршнем

$$\rho \cdot F_p \cdot \frac{dx}{dt} = g_1 = g_2 = g \quad (22)$$

6. Уравнение движения жидкости в жиклере 1

$$h_1 \frac{dg_1}{dt} = (P_1 - P_{1p}) \cdot F_1 \cdot N_1 - \overline{\Delta P_1} \cdot F_1 \cdot N_1 \quad (23)$$

7. Уравнение движения жидкости в жиклере 2

$$h_2 \frac{dg_2}{dt} = (P_{2p} - \overline{P_2}) \cdot F_2 \cdot N_2 - \overline{\Delta P_2} \cdot F_2 \cdot N_2 \quad (24)$$

8. Уравнение движения золотника

$$\left. \begin{aligned} M_s \frac{d^2x}{dt^2} &= F_p \cdot \Delta P_p + C \cdot N_s \cdot F_{s.e.3} \cdot \overline{\Delta P_3} - T_{spr} - k \cdot x \\ \Delta P_p &= P_{1p} - P_{2p} = \overline{P_{th}} - (P_1 - P_{1p}) - (P_{2p} - \overline{P_2}) + (P_2 - \overline{P_2}) \dots \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

9. Уравнение движения жидкости в тракте на участке  $l_2$

$$\frac{l_2}{F_l} \cdot \frac{dG_2}{dt} = (P_2 - \overline{P_3}) - \overline{\Delta P_{fr2}} \quad (26)$$

10. Уравнение движения жидкости в тракте на участке  $l_3$

$$\frac{l_3}{F_l} \cdot \frac{dG_3}{dt} = (\overline{P_2} - \overline{P_3}) - \overline{\Delta P_{fr3}} \quad (27)$$

11. Уравнение движения жидкости в окнах дросселя

$$\Delta P_{th} = P_1 - P_2 = \overline{\Delta P_{th}}$$

12. Уравнение движения жидкости в окнах золотника

$$\Delta P_3 = \overline{P_3} - P_3 = \overline{\Delta P_3}$$

Приведенную систему уравнений можно свести к двум уравнениям:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dg}{dt} &= Z(x, g, G, t) \\ \frac{dx}{dt} &= \frac{1}{\rho \cdot F_p} \cdot g \end{aligned} \right. \quad (28)$$

где



$$Z = \frac{1}{B} \left\{ F_p \left( B_{th} + B_{fr} \cdot \frac{l_2}{l} \right) \cdot G_2^2 \cdot \text{sign } G_2 + C \cdot N_s \cdot F_{s.e.3} \cdot B_3 \cdot G^2 \cdot \text{sign } G - \right. \\ \left. - T_{spr} - k \cdot x - F_p \cdot (B_1 + B_2) \cdot g^2 \cdot \text{sign } g + \frac{F_p}{F_l} \cdot l_2 \cdot \frac{dG}{dt} \right\} \quad (29)$$

$$G_2 = G - g; \quad B = \frac{M_s}{\rho F_p} + \frac{F_p h_1}{F_1 N_1} + \frac{F_p h_2}{F_2 N_2} + \frac{F_p l_2}{F_l}$$

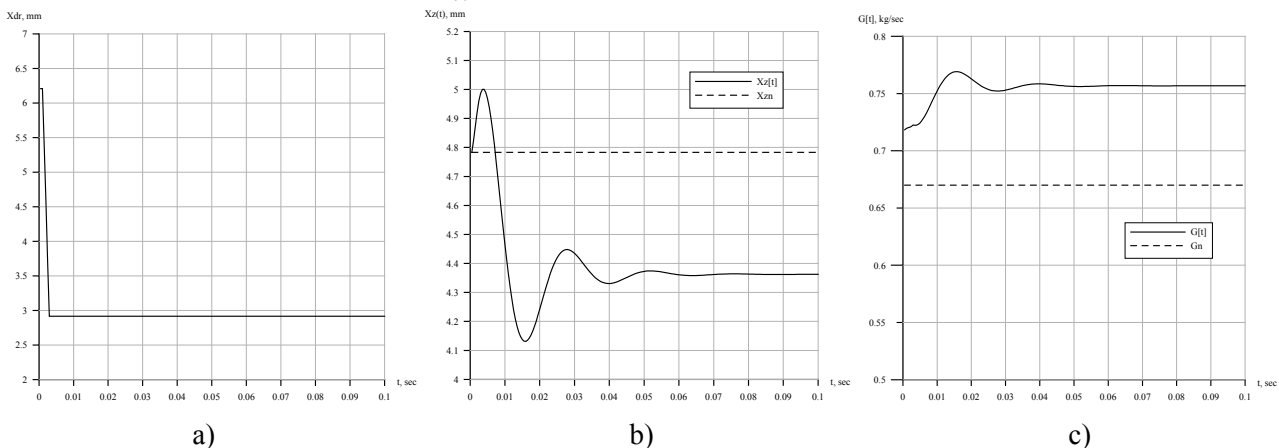
В этих соотношениях:

- $x_{th} = x_{th}(t)$  - задаваемый закон перемещения дросселя
- $x = x(t)$  - рассчитываемое перемещение золотника
- $G = G(t)$  - рассчитываемое изменение расхода через регулятор

Система (30) решается при следующих начальных условиях:

$$t = 0, \quad x = x_n, \quad g = g_n = 0, \quad x_{th} = x_{th,n} \quad \text{и граничном условии } \Delta P = \text{const}$$

В качестве примера на рис. 6 (b) и 6 (c) приведены характеристики  $x_{th}(t)$ ,  $G(t)$  переходного процесса регулятора, геометрические параметры которого содержатся в таблицах 1 и 2, когда закон изменения перемещения дросселя  $x_{th}$  имеет вид, приведенный на рис.6(a).



## 5. ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЯ

Принципиальная схема регулятора, схема которого приведена на рис.1, является динамическим звеном, которое в линейном приближении описывается дифференциальным уравнением второго порядка [1]:

$$T_2^2 \frac{d^2}{dt^2} \delta x + T_1 \frac{d}{dt} \delta x + \delta x = -K_I \delta G - K_{II} \frac{d}{dt} \delta G \quad (30)$$

В этом уравнении  $\delta x$  - безразмерное (отнесенное к номинальному значению) перемещение золотника, вызванное случайным отклонением расхода через регулятор;  $\delta G$  - безразмерное (отнесенное к номинальному значению) возмущение расхода;  $T_2$  - инерционная постоянная регулятора;  $T_1$  - постоянная демпфирования регулятора;  $K_I, K_{II}$  - коэффициенты усиления регулятора.

Параметры  $T_1, T_2, K_I, K_{II}$  являются динамическими параметрами регулятора. Они зависят от конструктивных характеристик регулятора и от режима его работы. Уравнение (30) не трудно получить из системы (28) путем ее линеаризации при условии  $x_{th} = \text{const}$ . Как видим, регулятор является колебательным звеном с затуханием. В составе двигателя регулятор может потерять устойчивость, благодаря действию обратной связи через двигатель (см. рис. 7).

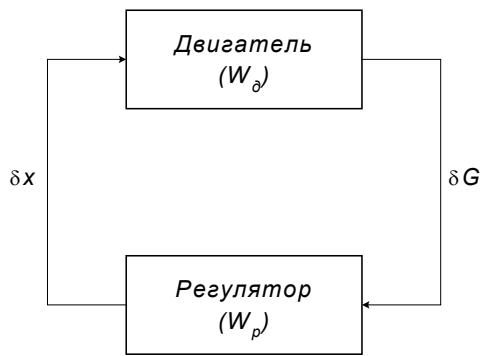


Рис. 7

Из соотношения (30) при гармонической зависимости переменных от времени нетрудно получить следующую частотную характеристику регулятора:

$$W_r = \frac{\overline{\delta x}}{\delta G} = \frac{-K_I - i\omega \cdot K_{II}}{1 + i\omega \cdot T_1 - \omega^2 T_2^2} \quad (31)$$

Если частотная характеристика двигателя, равная по определению  $W_e = \frac{\delta G}{\delta x} = W_e^+ + iW_e^-$  известна, то

условие существования автоколебаний в системе двигатель плюс регулятор запишется в виде:

$$W_e \cdot W_r = 1 \quad (32)$$

Из этого условия не трудно найти:

$$K_I = -\frac{1 - T_2^2 \omega^2 - K_{II} \omega \cdot W_e^-}{W_e^+} \quad (33)$$

$$T_1 = -\frac{K_I W_e^- + \omega K_{II} \cdot W_e^+}{\omega}$$

Рассматривая частоту  $\omega$  как параметр и считая известным  $W_e^+(\omega)$  и  $W_e^-(\omega)$  можно построить границу устойчивости в пространстве параметров  $K_I, T_1$  регулятора. Примерный вид этой границы показан на рис.8 [1].

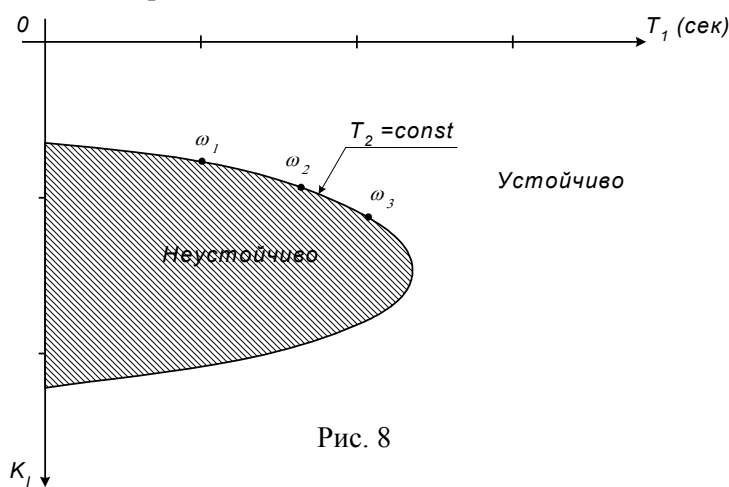


Рис. 8

Если в состав двигателя входит несколько регуляторов, влияющих друг на друга через двигательную установку, то анализ устойчивости подобной системы можно провести, обобщив рассмотренный выше алгоритм.

Результаты на рис.8 позволяют выбрать параметры регулятора  $T_1, K_I$  и  $T_2$  такими, при которых регулятор подобной конструкции будет работать устойчиво в составе заданного двигателя. Но для этого надо знать динамические характеристики двигателя. Однако на этапе проектирования агрегатов двигателя такой информации нет. По этой причине только на этапе доводки двигателя может быть выбрана окончательная конструкция регулятора, удовлетворяющая всем техническим требованиям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гликман Б.Ф. «Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей», Москва, «Машиностроение», 1974
2. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. «Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей», Москва, издательство МАИ, 1999
3. Lebedinsky E.V. «Multifunctional Mathematical Simulation of Liquid Rocket Engines (Principles of System Synthesis)». Conference on Propulsive Flows in Space Transportation Systems. Bordeaux, France, 11-15 September 1995, p.514-528