

УДК621.454.2

Я.Г. БАХМЕТ

Пекинский аэрокосмический университет, Китай

ПОСТРОЕНИЕ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ЖРД

В работе рассматривается регулятор расхода включающий в себя два основных элемента: дроссельную часть, обеспечивающую изменение сопротивления магистрали и золотниковую, стабилизирующую перепад давления на дросселе. Гидравлическое усилие на золотнике компенсируется с помощью поршня и пружины сжатия. Сочетание дроссельной и золотниковой частей обеспечивает пропорциональность расхода проходному сечению дросселя при постоянном значении перепада давлений. Представленная математическая модель регулятора позволяет вычислить его статическую характеристику в зависимости от конструктивных параметров. Модель позволяет провести численные эксперименты по выбору конструктивных параметров с минимальным статизмом статической характеристики.

Ключевые слова: регулятор расхода, ЖРД, статическая характеристика, дроссель, золотник, геометрические параметры, модель.

Введение

В настоящее время двигатели ЖРД являются единственными двигателями обеспечивающими доставку полезной нагрузки на околоземную орбиту. Тенденция роста такой нагрузки, связанная с растущим количеством народнохозяйственных задач, требует совершенствования двигателей ЖРД, постоянной их модификации, поиска оптимальных конструктивных средств улучшения их работы. Несмотря на то, что период разработки таких двигателей и их срок эксплуатации у инженерии довольно значительный (а первые запуски ЖРД можно отнести к 30-тым гг.), задачи увеличения тяги таких двигателей, управляемости их, выявляют новые проблемы стоящие на пути разработки таких двигателей, требуют переоценки традиционных подходов к конструированию новой технике.

Особенности работы ЖРД требуют использования определенного элемента в системе подачи топлива, обеспечивающего регулирование расхода топлива. Неоднозначность возможности регулирования подачи топлива привело к созданию целого спектра конструкций регуляторов с отсутствием их классификации и обоснованным их выбором. Такие элементы представляют собой гидромеханические регуляторы расхода (РР). Создание таких гидравлических регуляторов, обычно связано с экспериментальной отработкой ЖРД. Рост мощности, тяговооруженности приводит и к росту затрат на экспериментальные исследования проектируемых систем ЖРД. В этом случае становится актуальной задача замены экспериментальной отработки регуляторов расхода численным экспериментом.

1. Характеристики и проектирование регуляторов расхода

При проектировании регуляторов расхода (РР) различают несколько видов его характеристик. Одна из таких характеристик – статическая характеристика регулятора. Это зависимость расхода через регулятор от перепада давления на нем: $\dot{m} = f(\Delta P)$. При этом считается, что идеальный регулятор – это регулятор, который при любых отклонениях перепада давления от номинального, возвращает расход к его номинальному значению. Такой регулятор расхода называется астатическим.

Различают положительный статизм, когда кривая характеристики является монотонно возрастающей и отрицательный статизм, когда кривая монотонно убывает на рассматриваемых участках.

Определено, что РР с отрицательным статизмом приводит к автоколебательным режимам работы.

Инженерная задача проектирования заключается в том, что бы обоснованно выбрать параметры такой конструкции, которая удовлетворяла бы техническим требованиям к проектируемому объекту. Такая задача является не корректной математической задачей, так как не допускает однозначного решения. Используя модельное представление РР, можно рассматривать процесс проектирования как выбор наилучшего варианта из возможных множества расчетных вариантов.

Так как регулятор расхода проектируется на установившийся номинальный режим работы двигателя, то на этапе проектирования используется стационарная математическая модель регулятора расхода.

В приведенной работе была рассмотрена задача построения расходной характеристики регулятора расхода ЖРД представленного в работе [2] с возможностью исследования влияния конструктивных его параметров на вид характеристики.

2. Описание регулятора расхода

Рассматриваемый в работе регулятор расхода включают в себя два основных элемента:

- дроссельную часть, обеспечивающую изменение сопротивления магистрали,
- стабилизатор давления, для поддержания постоянным перепад давления на дроссельной части.

В качестве стабилизатора используется золотник, гидравлическое усилие на котором компенсируется с помощью поршня и пружины сжатия. Сочетание дроссельной и золотниковой частей обеспечивает пропорциональность расхода проходному сечению дросселя при постоянном значении перепада давлений [1]. За основу конструкции взята модель предложенная в работе [2], рис. 1. Совмещение в регуляторе расхода двух функций в одном агрегате классифицирует систему как многорежимный регулятор.

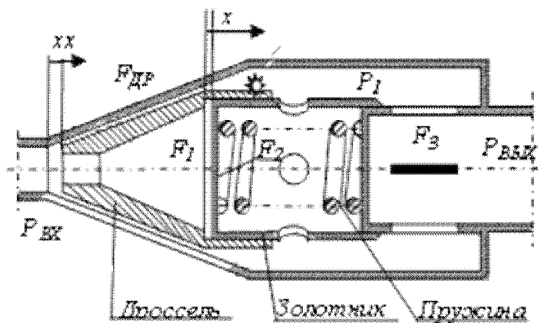


Рис. 1. Конструктивная схема регулятора расхода

3. Статический режим

Уравнения статики составляются для внутренних элементов регулятора расхода представленных на рис. 1. За основу была выбрана модель рассмотренная в работе [3]. Она включает в себя: баланс сил на подвижной части регулятора – золотнике, перепад давления на дросселе и золотнике, суммарный перепад давления на регуляторе.

1. Баланс сил на подвижной части регулятора – золотнике.

Подвижная часть регулятора расхода – золотник характеризуется геометрическими размерами поршня и давлением окружающей среды.

Уравнение равновесия золотника под действием гидравлических сил и пружины запишется в виде:

$$\Delta P_D \cdot (F_1 - F_2) + C \cdot \Delta P_3 \cdot F_{3K} - T_{II} - k \cdot x = 0,$$

где $\Delta P_D = P_{ВХ} - P_1$ – перепад давления на дросселе;

$\Delta P_3 = P_1 - P_{ВЫХ}$ – перепад давления на кромке золотника;

P_1 – давление жидкости внутри полости золотника;

$T_{II} = k \cdot x_0$ – начальный затяг пружины;

k – жесткость пружины;

x_0 – длина пружины в затянутом положении;

x – смещение поршня от его начального положения;

$F_1 - F_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_3^2 - d_3^2)$ – рабочая площадь поршня;

–

C – коэффициент гидродинамической силы;

$F_{3K} = 2 \cdot \delta_3 \cdot \Delta l_3 \cdot N$ – суммарная площадь кромок золотника в пределах золотниковых отверстий;

δ_3 – толщина кромки золотника;

Δl_3 – ширина кромки золотника в пределах золотниковых отверстий;

N – число золотниковых отверстий.

2. Перепад давления на дросселе и золотнике запишется в виде:

$$\dot{m}_D = \mu_D \cdot F_D \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_D \cdot \rho},$$

$$\dot{m}_3 = \mu_3 \cdot F_3 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_3 \cdot \rho},$$

где \dot{m}_D – расход жидкости через дроссель;

μ_D – коэффициент расхода дросселя;

F_D – площадь отверстия дросселя;

ρ – плотность жидкости;

\dot{m}_3 – расход жидкости через золотник;

F_3 – площадь отверстия золотника;

μ_3 – коэффициент расхода дросселя.

При этом, при условии неразрывности потока, следует: $\dot{m}_D = \dot{m}_3$.

Из приведенных выражений следует:

$$\Delta P_D = \frac{\dot{m}_D^2}{2 \cdot \rho \cdot \mu_D^2 \cdot F_D^2}; \quad \Delta P_3 = \frac{\dot{m}_3^2}{2 \cdot \rho \cdot \mu_3^2 \cdot F_3^2}.$$

3. Суммарный перепад давления на регуляторе расхода равен:

$$\Delta P = \Delta P_D + \Delta P_3 + \Delta P_T,$$

где ΔP_T – потери давления на трение жидкости о корпус в проточной части регулятора.

$$\Delta P_T = \xi \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{F_K}.$$

где ξ – коэффициент потерь на трение;

V – скорость потока жидкости в регуляторе;

D – внутренний диаметр корпуса;

$F_K = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$ – площадь поперечного сече-

ния потока жидкости в регуляторе;

d – наружный диаметр золотника;

L – длина от отверстия дросселя до середины отверстия золотника.

Но так как $V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot F_K}$, то можно записать:

$$\Delta P_T = \xi \cdot \frac{\rho \cdot \dot{m}^2}{2 \cdot \rho^2 \cdot F_K^2} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{F_K} = \xi \cdot \frac{\dot{m}^2}{2 \cdot \rho \cdot F_K^3} \cdot \pi \cdot D \cdot L.$$

4. Геометрические параметры окон дросселя и золотника.

Проточное сечение дросселя определяется двумя коническими поверхностями, в зазоре между которыми протекает жидкости, рис. 1.

Площадь проходного сечения дросселя F_D определяется как минимально возможная площадь кольца между двумя коническими поверхностями срезанных конусов с диаметрами d_{xx} , d_D . Это кольцо представляет собой так же срезанный конус с образующей l_{xx} . Необходимый дроссельный зазор устанавливается при настройке РР на необходимый режим от внешнего источника регулирования и определяется смешением при регулировании дроссельного элемента на величину x .

Расчетные выражения для площади проходного сечения дросселя имеют вид: F_D

$$F_D = F(xx) = \pi \cdot \left(\frac{d_x}{2} + \frac{d_D}{2} \right) \cdot l_{xx} \cdot \sin \beta,$$

где $l_{xx} = xx \cdot \sin \beta$,

$$\frac{d_x}{2} = \frac{d_D}{2} + l_{xx} \cdot \cos \beta = \frac{d_D}{2} + xx \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta,$$

$$F(xx) = \pi \cdot \left(\frac{d_D}{2} + xx \cdot \sin \beta \cos \beta + \frac{d_D}{2} \right) \cdot xx \cdot \sin \beta,$$

$$F(xx) = \pi \cdot (d_D + xx \cdot \sin \beta \cos \beta) \cdot xx \cdot \sin \beta = \pi (d_D \cdot xx \cdot \sin \beta + xx^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos \beta),$$

$$F_D(xx) = \pi (d_D \cdot xx \cdot \sin \beta + xx^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos \beta).$$

Площадь проходных сечений золотника зависит от вида отверстий.

Пусть $F_3 = F_3(x)$.

Для прямоугольного отверстия:

$$F_3(x) = (b - x) \cdot a \cdot N,$$

где a – ширина прямоугольного отверстия золотника;

b – длина прямоугольного отверстия золотника.

4. Результаты расчета характеристики регулятора расхода

Расчетные уравнения по аналогии с работой [3], были представлены в виде параметрической функции в зависимости от перемещения золотника

$$\Delta P = \Phi 1(x) \cdot \Phi 2(x),$$

$$G = \sqrt{\Phi 1(x)},$$

$$\text{где } \Phi 1(x) = \frac{k \cdot x_0 + k \cdot x}{\frac{F_{12}}{8 \cdot \rho \cdot \mu_D^2 \cdot F_D^2} + \frac{C \cdot \delta_3 \cdot \Delta l_3}{\rho \cdot \mu_3^2 \cdot (b-x)^2 \cdot a^2 \cdot N}},$$

$$\Phi 2(x) = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \mu_D^2 \cdot F_D^2} + \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \mu_3^2 \cdot (b-x)^2 \cdot a^2 \cdot N^2} + \frac{\pi \cdot \xi \cdot D \cdot L}{2 \cdot \rho \cdot F_K^3}.$$

Предварительно, задавая значение xx , как параметра характеризующего проходное сечение дросселя, определялось сечение:

$$F_D(xx) = \pi (d_D \cdot xx \cdot \sin \beta + xx^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos \beta).$$

Для расчета использовались представленные параметры РР в работе [3] и приведенные в таблице.

Построенная расходная характеристика представлена на рис. 2.

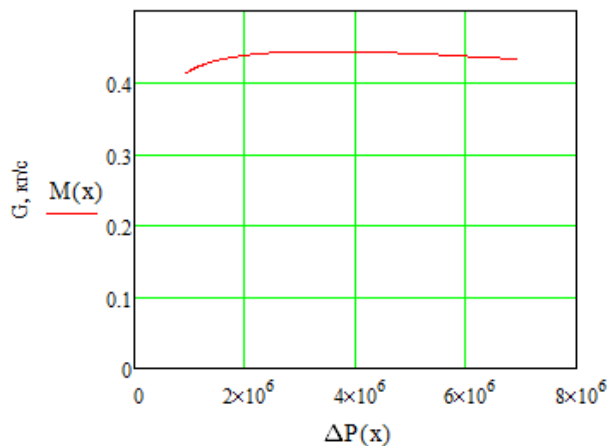


Рис. 2. Расходная характеристика

Для оценки статизма характеристики, была определена производная расходной характеристики как функции заданной параметрически, рис. 3.

Результаты расчета показали, что представленный регулятор расхода для заданных конструктивных параметров характеризуется наличием отрицательной производной.

Отрицательное значение производной характеризует монотонно убывающую часть кривой характеристики расхода, то есть наличие отрицательного статизма.

Таблица

Параметры регулятора расхода

№	Значение	Параметр
1	$d_D = 16 \cdot 10^{-3}$	начальный диаметр дросселя, м
2	$\beta = 0,366$	угол конуса дросселя, рад
3	$D = 0,06$	внутренний диаметр корпуса, м;
4	$d = 0,045$	наружный диаметр золотника, м
5	$D_3 = 0,016$	диаметр внешней торцевой площадки, м
6	$d_3 = 0,013$	диаметр внутренней торцевой площадки, м
7	$k = 682$	жесткость пружины, $\frac{Н}{М}$;
8	$x_0 = 30 \cdot 10^{-3}$	длина пружины в затянутом положении, м
9	$\rho = 1140$	плотность жидкости, $\frac{кг}{М^3}$
10	$\mu_D = 0,7$	коэффициент расхода дросселя
11	$C = 0,4$	коэффициент гидродинамической силы
12	$\delta_3 = 1 \cdot 10^{-3}$	толщина кромки золотника, м
13	$\mu_3 = 0,7$	коэффициент расхода золотника
14	$\Delta l_3 = 1 \cdot 10^{-3}$	ширина кромки золотника в пределах золотниковых отверстий, м
15	$b = 15 \cdot 10^{-3}$	длина прямоугольного отверстия золотника, м
16	$a = 1 \cdot 10^{-3}$	ширина прямоугольного отверстия золотника, м
17	$N = 1$	число золотниковых отверстий
18	$L = 0,085$	длина от отверстия дросселя до середины отверстия золотника, м
19	$\xi = 7,8$	коэффициент потерь на трение

Примечание: угол $\beta = 21^\circ$

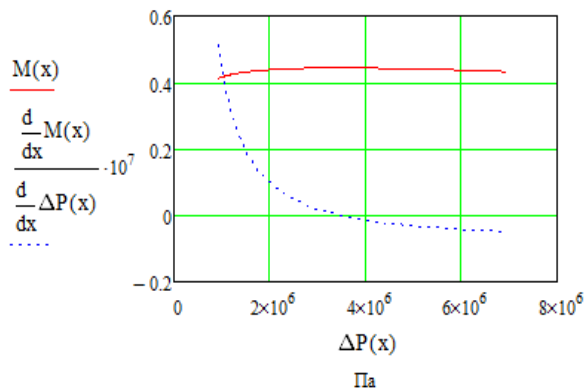


Рис. 3. Производная расходной характеристики

Наличие отрицательного статизма объясняется тем, что гидродинамические силы при перемещении подвижных частей регулятора, изменяются больше, чем упругая сила пружины [1].

Для определения влияния жесткости пружины на статическую характеристику регулятора расхода, были построены зависимости производных статических характеристик для регулятора расхода с жесткостью пружины $k_1 = 682$ н/м и с $k_2 = 1200$ н/м.

Результаты построенных графиков представлены на рис. 4.

Сделан вывод, что повышение жесткости пружины смещает появление отрицательного статизма по перепаду давления вправо.

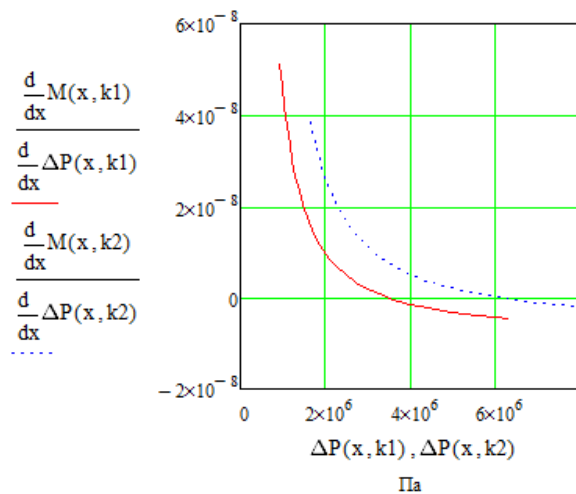


Рис. 4. Производная расходной характеристики в зависимости от жесткости пружины

Приведенная модель позволяет провести численные эксперименты по выбору конструктивных параметров с минимальным статизмом статической характеристики.

Литература

1. Гликман, Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.Ф. Гликман. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

2. Беляев, Е.Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Е.Н. Беляев, В.К. Чванов, В.В. Черваков. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 228 с.

3. Лебединский, Е.В. Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД [Электронный ресурс] / Е.В. Лебединский, Б.В. Зайцев, А.А. Соболев // Официальный сайт ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша». – Режим доступа: <http://www.kerc.msk.ru>. – 14.06.2013.

Поступила в редакцию 14.06.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: профессор Джан Лихой, Пекинский аэрокосмический университет, Китай.

ПОБУДОВА ВИТРАТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРІВ ВИТРАТ ЖРД

Я.Г. Бахмет

У роботі розглядається регулятор витрат, який поєднує у собі два основних елементи: дросельну частину, що забезпечує зміну опори магістралі і золотника, за рахунок стабілізації перепаду тиску на дроселі. Гідрравлічне зусилля на золотнику компенсується за допомогою поршня і пружини стиснення. Поєднання дросельної і золотникової частин забезпечує пропорційність витрат прохідному перетину дроселя при постійному значенні перепаду тисків. Представлена математична модель регулятора дозволяє вичислити його статичну характеристику, залежну від конструктивних параметрів. Модель дозволяє провести чисельні експерименти з вибору конструктивних параметрів з мінімальним статизмом статичної характеристики.

Ключові слова: регулятор витрат, ЖРД, статична характеристика, дросель, золотник, геометричні параметри, модель.

BUILDING FLOW CHARACTERISTIC OF FLOW CONTROLLER LJE

I.G. Bakhmet

In this paper were consider flow controller that include two main elements: throttle part, that provide changes in resistance line and spool part, that stabilize drop pressure across the inductor. The hydraulic force on the spool can be compensated by the piston and the compression spring. Combination of throttle and spool parts provides equaling proportional flow to the throttle flow area with constant value of pressure drop. Mathematical model of flow controller allow to calculate his static characteristic that depend of his design parameters. The model allows for the choice of numerical experiments on the design parameters with minimal statism static characteristic.

Key words: flow control, LJE, expander, static characteristic, throttle, spool, geometric parameters of the model.

Бахмет Яна Геннадьевна – аспирант школи «Аэроавтики и астронавтики» Пекинского аэрокосмического университета ПАКУ, Пекин, Китай, e-mail: bahmet_yana@mail.ru.