

Канд. техн. наук В. Н. Цыганов

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА СОПЛО-ЗАСЛОНКА НА ГОРЯЧЕМ ГАЗЕ

Рассмотрены основные математические соотношения для построения статических характеристик поршневого двухкаскадного пневмопривода сопло-заслонка с рабочим телом – продуктами сгорания пороха.

Розглянуто основні математичні співвідношення для побудови статичних характеристик поршневого двокаскадного пневмоприводу сопло-заслінка з робочим тілом – продуктами згорання пороху.

The basic mathematical relations are considered to construct static characteristics of nozzle-shutter two-stage piston pneumatic drive with the working medium – powder combustion products.

Развитие систем управления летательных аппаратов приводит к поиску и совершенствованию их исполнительных устройств. В последние годы внимание разработчиков обращено на применение горячего газа высокого давления в качестве рабочего тела для быстродействующего пневмопривода [1, с. 21].

Распространено мнение, что поршневые пневматические исполнительные устройства значительно уступают в быстродействии гидравлическим и не могут с ними конкурировать. Однако быстродействие привода зависит не только от сжимаемости рабочего тела, но и от скорости движения выходного звена, скорость же выходного звена (поршня) зависит от объемного расхода через цилиндр. Для пневматических систем можно обеспечить большие объемные расходы при значительно меньших проходных сечениях дросселей, чем для гидросистем. Это обусловлено существенными различиями плотности жидкости и газа. Для одинаковых объемных расходов проходные сечения для жидкости более чем в 25 раз больше проходных сечений для газа, соответственно диаметры проходных отверстий для жидкости в 5 раз больше диаметров для газа [2]. Потенциал применения пневматических исполнительных устройств далеко не исчерпан, а исследование свойств поршневых исполнительных устройств позволяет найти приемлемые по характеристикам и

простые по реализации конструктивные решения. Поэтому представляется актуальным рассмотрение статических характеристик привода сопло-заслонка на горячем газе и возможностей их расчета средствами ПЭВМ. В качестве конкретного примера рассмотрена схема на рис. 1.

Исходные положения

Теоретической основой статической модели является материал главы XIII, написанной Ритхофом [3].

Аналитическое определение статических характеристик пневмопривода с поршневым исполнительным механизмом основывается на следующих допущениях:

1. Газ является идеальным.
2. Течение газа в полости осуществляется без сопротивления.
3. Рабочие процессы протекают адиабатически.
4. Температура газа, поступающего в рабочую полость, равна температуре газа внутри полости.
5. Давление в полости распределено равномерно.

Массовый расход газа через дроссель записывается в таком виде:

$$M = \mu \omega c \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} F(\beta),$$

где $\beta = \frac{P_2}{P_1}$,

μ – коэффициент расхода;

ω – площадь отверстия;
 p_1 – давление газа перед отверстием;
 T_1 – абсолютная температура газа;
 p_2 – давление газа за отверстием.

$$C_1 = \sqrt{\left(\frac{2}{k-1}\right)\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{R}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}},$$

где R – газовая постоянная.

$$F(\beta) = \begin{cases} 1 & \text{при } \beta \leq \beta_{кр}, \\ C_1 \sqrt{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}} & \text{при } \beta_{кр} < \beta < 1, \\ 0 & \text{при } \beta \geq 1. \end{cases} \quad (1)$$

В формуле (1) $\beta_{кр}$ и C_1 являются выражениями от показателя адиабаты k :

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

Первая строка формулы (1) характеризует истечение со звуковой скоростью – критический режим, вторая – режим течения с дозвуковой скоростью, или докритический. Третья строка описывает случай, когда давление перед дросселем меньше давления за ним.

Максимальный расход через дроссель соответствует критической скорости (скорости звука), которая определяется состоянием газа до дросселя и совершенно не зависит от противодействия p_2 той среды, куда происходит истечение. В этом существенное различие между истечением газов и капельных жидкостей.

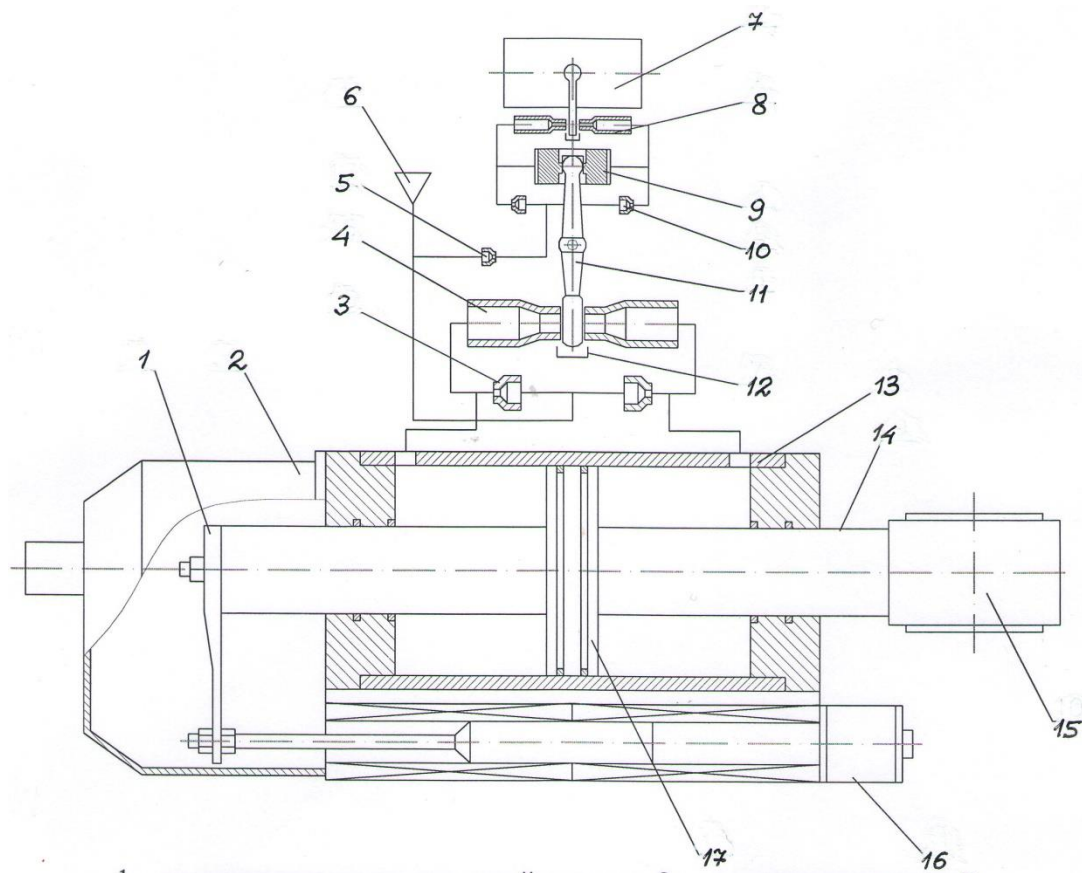


Рис. 1. Схема сервомеханизма поршневого типа:

1 – траверса; 2 – кронштейн; 3 – постоянный дроссель второго каскада; 4 – сопло второго каскада; 5 – гасящий дроссель первого каскада; 6 – подача пневматической энергии; 7 – электромеханический преобразователь; 8 – сопло первого каскада; 9 – плунжер первого каскада; 10 – постоянный дроссель первого каскада; 11 – рычаг-заслонка второго каскада; 12 – выхлоп; 13 – поршневой исполнительный механизм; 14 – шток; 15 – серьга; 16 – индукционный датчик обратной связи; 17 – поршень

Статическая модель

С учетом сделанных допущений уравнения статики пневмоцилиндра совместно с пневмораспределителем имеют следующий вид [3]:

$$q_1 = \frac{1}{\alpha} \frac{p_s}{p_1} F\left(\frac{p_1}{p_s}\right) - 1 + \gamma; \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{1}{\alpha} \frac{p_s}{p_2} F\left(\frac{p_2}{p_s}\right) - 1 - \gamma, \quad (3)$$

где $q_1 = \frac{Q_1}{Q_m}$;

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_m};$$

$$Q_m = \mu c S_0 R \sqrt{T_s};$$

$$\gamma = \frac{x}{x_0};$$

$$\alpha = \frac{S_0}{S_{др}},$$

где q_1, q_2 – безразмерные объемные расходы, поступающие к пневмоцилиндру от управляющего устройства;

Q_m – максимальный объемный расход;

x – положение заслонки;

x_0 – начальный зазор между соплом и заслонкой;

p_s – давление источника питания;

T_s – температура газа источника питания;

p_1, p_2 – давления в левой и правой полостях цилиндра;

$S_0, S_{др}$ – площадь проходного сечения переменного дросселя при среднем положении заслонки и площадь сечения постоянного дросселя;

α – отношение площадей дросселей является важным параметром распределителя сопло–заслонка, влияющим на его характеристики.

Статические зависимости безразмерного расхода через пневмоцилиндр от относительного давления в рабочих камерах для двухщелевого управляющего устройства получены графическим построением кривых, описываемых уравнениями (2) и (3) по данным таблиц газов [3]. Это по-

строение выполняется, исходя из условий работы в статическом режиме:

$$q_1 = -q_2 = q. \quad (4)$$

Результаты построений приведены на рис. 2-6

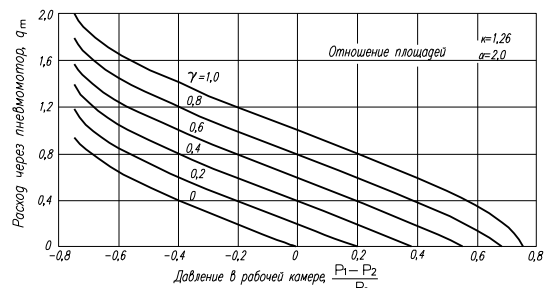


Рис. 2. Расходно-перепадные характеристики при $\alpha=2$

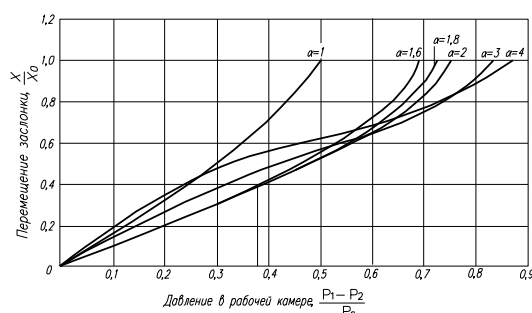


Рис. 3. Изменение перепада давлений в зависимости от перемещения заслонки при неподвижном поршне и различных значениях α

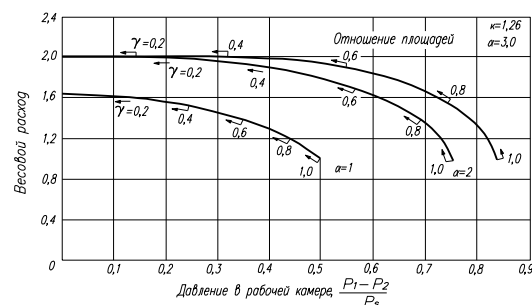


Рис. 4. Кривые зависимости массового расхода через управляющее устройство сопло–заслонка от относительного перепада и параметра α

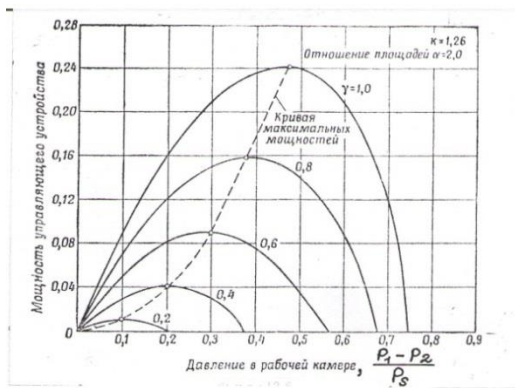


Рис. 5. Кривые зависимости относительной мощности от уровня командного сигнала при $\alpha=2$

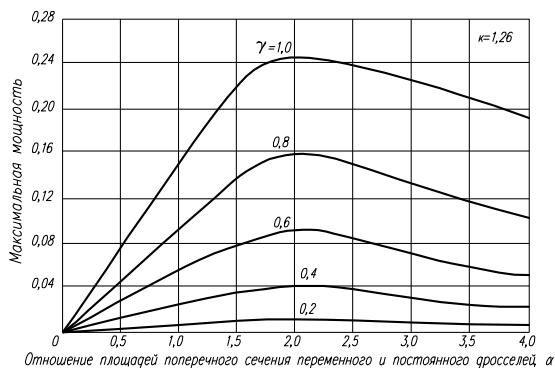


Рис. 6. Кривые зависимости относительной мощности от α

Задача состоит в том, чтобы построить подобные кривые, решая уравнение (4) численным методом с помощью разработанной программы, и подтвердить результаты расчетов, приведенных в [3]. В качестве основного выбран график на рис. 5. Этот график, построенный по результатам работы вычислительной программы, приведен на рис. 7.

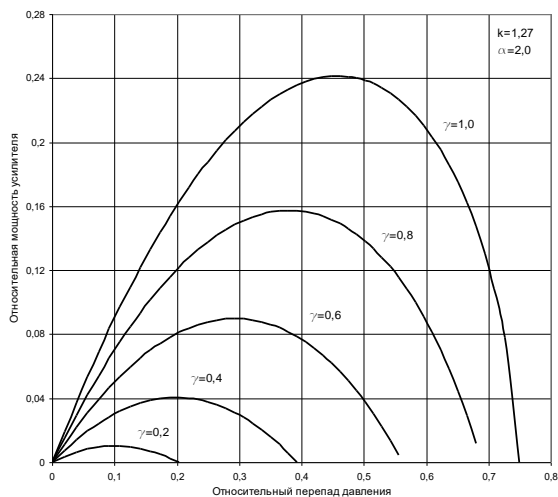


Рис. 7. Кривые зависимости относительной мощности от уровня командного сигнала при $\alpha=2$ по результатам расчета

Сравнение рис. 5 и 7 говорит о полном совпадении кривых, что подтверждает правильность работы программы и корректность данных в [3].

Программа расчета

Ниже приведен листинг программы на языке Turbo Pascal.

```

Program StatikaL1; {Программа расчета статических характеристик привода на горячем газе}
Const n1=1.5748; {2/k, где k-показатель адиабаты, k=1,27}
      n2=1.7874; {(k+1)/k}
      c1=4.6347; {формула (5)}
      xkp=0.5512; {формула (4)}
      eps=1.E-6; {точность вычисления корня уравнения}
      alfa=2.0; {отношение начальной площади переменного дросселя к площади постоянного дросселя}
var dp: real;
    j,i: integer;
    q1,q2,p1,p2: real;
    x1,x21,x22:real;
    x2:real;
    gamma: real;
    u1: real;
    rez:text; {Описание файла результатов как текстового файла}
    rez2:text; {Описание файла результатов для работы delprop}
{Описание функций статических характеристик:}
function F(x:real):real;
{Газодинамическая функция (3)}
begin
  if x<=xkp then F:=1.0 else if x<1.0 then
    F:=c1*sqrt(exp(n1*ln(x))-exp(n2*ln(x))) else F:=0.;
  end; {конец описания функции (3)}
function u(x:real):real;
{Газодинамическая функция 2}
begin
  u:=(1.0/x)*F(x);
end; {конец тела функции u}
{Процедура поиска корня уравнения делением отрезка пополам:}
procedure delprop(x1,x21,x22:real;var c:real);
{x1,x21,x22-параметры-значения,c-параметр}

```

```

(rez, 'd:\bp\walnik\statchar.rez');
{Процедура Assign является стандартной процедурой Turbo Pascal и присваивает имя внешнего файла файловой переменной}
  assign
(rez2, 'd:\bp\walnik\delpop.rez2');
  rewrite (rez);
  rewrite (rez2);
  writeln(rez, '      Работа главной программы');
  writeln(rez, '      x1=      ', ' ');
  x2=      ', ' dp=      ', ' q1=
', ' q2=      ', ' p1=      ', ' p2=
');
  for j:=0 to 5 do
  begin {начало внешнего цикла}
    begin
      x1:=0.45+0.01*i;
    {writeln(rez, 'i=', i:4, ' ', 'x1=', x1:10);}
      delpop(x1, 0.01, 0.8, x2);
      dp:=x1-x2;
      q1:=(1.0/alfa)*u(x1)-1.0+gamma; {расход через поршень}
      q2:=1.0+gamma-(1.0/alfa)*u(x2); {расход через поршень}
      p1:=dp*q1; {относительная мощность механизма поршневого типа}
      p2:=dp*q2; {относительная мощность механизма поршневого типа}
      writeln(rez, x1:10:3, x2:10:5, dp:10:5, q1:10:5, q2:10:5, p1:10:5, p2:10:5);
    end;
  end; {конец внешнего цикла}
  close (rez);
  close (rez2);
end.

```

Анализ характеристик

Выбор параметра $\alpha=2$ объясняется графиком на рис. 6, который подтверждает его оптимальность.

Максимальная мощность газового потока определяется как произведение давления источника питания и максимального объемного расхода:

$$N_m = p_s Q_m.$$

Из рис. 7 следует, что пневмоцилиндр может развить максимальную мощность, не превышающую $0,24 \cdot N_m$ при перепаде давлений $0,47p_s$, то есть максимальная вы-

ходная мощность, обеспечиваемая пневмоцилиндром с устройством управления сопло-заслонка, равна:

$$N_{\text{вых}} = 0,24 p_s \mu c S_0 R \sqrt{T_s}. \quad (5)$$

Эффективную площадь поршня можно найти из выражения

$$S_{\Pi} = \frac{R_H}{0,47 p_s},$$

где R_H – заданная максимальная нагрузка, при которой исполнительное устройство должно развивать требуемую скорость v_H , а его мощность

$$N_{\text{вых}} = R_H v_H. \quad (6)$$

Приравняв (6) к выражению (5), получаем формулу для вычисления основного геометрического параметра управляющего устройства S_0 :

$$S_0 = \frac{R_H v_H}{0,24 p_s \mu c R \sqrt{T_s}}. \quad (7)$$

Максимальная тормозная сила сервомеханизма определяется как произведение площади поршня на максимальный перепад p_1-p_2 при $\gamma = 1$ и нулевой скорости поршня. Из рис. 7 следует, что максимальный перепад равен $0,74p_s$, а тормозная сила $R_m = 0,74p_s S_{\Pi}$. Коэффициент запаса по тормозной силе равен отношению R_m к заданной противодействующей нагрузке R_H :

$$k_m = \frac{R_m}{R_H} = \frac{0,74 p_s S_{\Pi}}{0,47 p_s S_{\Pi}} = 1,57.$$

Скорость холостого хода определяется по графику на рис. 2 и равна отношению максимального объемного расхода к площади поршня:

$$v_{\text{хх}} = \frac{Q_m}{S_{\Pi}} = \frac{\mu c S_0 R \sqrt{T_s}}{S_{\Pi}}. \quad (8)$$

Подставив S_0 из (7) в (8), найдем

$$\frac{v_{\text{хх}}}{v_H} = \frac{R_H}{0,24 p_s S_{\Pi}} = \frac{0,47 p_s S_{\Pi}}{0,24 p_s S_{\Pi}} = 1,96.$$

Управление исполнительным устройством

Схема на рис. 1 позволяет использовать электромеханический преобразователь 7 малой мощности. С целью упрощения конструкции, повышения надежности и достижения максимального быстродействия наиболее желательным является дискретное управление, в частности управление посредством широтно-импульсной модуляции [4]. С выхода усилителя-модулятора, который конструктивно объединяет усилитель сигнала рассогласования, формирующий элемент и выходной усилитель мощности, прямоугольные разнополярные импульсы напряжения, промодулированные по ширине сигналом рассогласования, поступают на обмотки электромеханического преобразователя 7. Под действием этих импульсов якорь преобразователя и жестко соединенная с ним заслонка пневмоусилителя перебрасываются из одного крайнего положения в другое, то есть пневмоусилитель является дискретным элементом. С этой целью применен свободно плавающий плунжер 9, перемещение которого ограничивается упорами. Пневмоусилитель рассчитан так, чтобы закон движения плунжера имел вид импульсов той же частоты и длительности, что и входные импульсы напряжения. Нормальная работа сервомеханизма с широтно-импульсным управлением по скорости обеспечивается тогда, когда заслонка второго каскада успевает перемещаться между крайними положениями за половину периода переключения импульсов [5].

В результате механизм с широтно-импульсным управлением скоростью поршневого двигателя при разомкнутой обратной связи отработывает среднюю скорость, пропорциональную входному сигналу. После замыкания жесткой отрицательной обратной связью с помощью датчика 16 система осуществляет непрерывное слежение по положению штока.

Выводы

1. Исследование статических характеристик привода на горячем газе, построенного по схеме сопло–заслонка, позволило создать расчетную базу для проектирования таких устройств с широким диапазо-

ном заданных мощностей. Выявлены энергетические свойства схемы: максимальный перепад давлений на поршне не превосходит 74 % давления источника питания; коэффициент запаса по тормозной силе составляет 1,57; скорость холостого хода превосходит скорость при максимальной нагрузке в 1,96 раза.

2. Программа расчета безразмерных статических характеристик дала возможность убедиться в корректности ценного материала, приведенного в [3], и обеспечить расчет без использования газодинамических таблиц. Основой программы послужил разработанный на языке Turbo Pascal алгоритм поиска корней уравнений методом деления пополам.

3. В качестве реального использования привода на горячем газе с высокими динамическими характеристиками рекомендован импульсный метод управления исполнительным устройством, который позволяет существенно упростить конструкцию устройства.

Список использованной литературы

1. Олейник В. П. и др. Статические характеристики газового привода со струйным двигателем / В. П. Олейник, Ю. А. Еланский, В. Н. Коваленко, Л. Г. Калугер, Е. В. Внуков. *Космическая техника. Ракетное вооружение*: сб. науч.-техн. ст. 2015. Вып. 1. Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». С. 21-27.

2. Корнилов Ю. Г. и др. Элементы и системы пневматики. К., 1968. 143 с.

3. Гидравлические и пневматические силовые системы управления / Под ред. Дж. Блэкборна, Г. Ритхофа, Дж. Л. Шерра. М., 1962. 614 с.

4. Мертаф С. А. Введение в теорию электрогидравлического сервомеханизма с управлением по ускорению, работающего в режиме переключения. *Вопросы ракетной техники*. 1961. № 2. С. 74-95.

5. Банштык А. М. Электрогидравлические сервомеханизмы с широтно-импульсным управлением. М., 1972. 144 с.

Статья поступила 11.08.2016