

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РУЛЕВОЙ МАШИНЫ

А. В. МЕСРОПЯН

УГАТУ, факультет авиационных двигателей
Тел: (3472) 23 09 44 E-mail: alla_pgm@mail.ru

Аннотация: Представлен расчет статистических характеристик стохастической модели струйной гидравлической рулевой машины. Методы математической статистики позволили обработать имеющиеся экспериментальные данные и определить стохастические коэффициенты уравнений. Статические характеристики построены с учетом случайного разброса коэффициентов восстановления расхода и давления в струйном гидрораспределителе и сил сухого трения в гидродвигателе.

Ключевые слова: рулевая машина, стохастическая модель, статические характеристики

Современный этап развития ракетно-космической техники характеризуется ростом энергооборуженности летательных аппаратов (ЛА). Следствием этого является ужесточение требований к системам управления, в состав которых входят и рулевые машины (РМ). Под РМ понимаются электрогидравлические агрегаты, служащие для управления рулевыми поверхностями ЛА или положением входного звена бустера.

Струйные РМ (СГРМ), как и большинство реальных объектов и систем управления, являются стохастическими. В процессе эксплуатации численные значения параметров рулевых машин часто изменяются в широких пределах, что может отразиться на качестве процессов управления. Это объясняется протеканием физических процессов, происходящих в высоконапорных струйных гидросилителях (СГУ), под влиянием вибраций, кратковременных перегрузок, при изменении температуры и загрязненности рабочей жидкости. Процессы старения и износа приводят к постоянному дрейфу статических и динамических характеристик, весьма трудно подлежащих предварительному учету. Зачастую бывает так, что рулевая машина, имеющая при наладке требуемые значения параметров и характеристик, при сдаче в эксплуатацию перестает нормально функционировать без видимого вмешательства извне, что, очевидно, может быть следствием случайных вариаций ее параметров. Причиной отклонения численных значений параметров СГРМ от случайных вариаций параметров серийно выпускаемых изделий являются, в первую очередь, производственные допуски при изготовлении и сборке.

Таким образом, анализ статических, динамических, энергетических и прочих характеристик рулевых машин без учета стохастичности их параметров может привести и приводит к неправильным результатам. Конечно, в каждой рулевой машине влияние одних и тех же параметров на качество процессов управления будет проявляться по-разному. Поэтому необходимо учитывать вероятность изменения параметров регулируемого объекта и других элементов СГРМ на всех этапах ее создания.

Рассмотрим СГРМ с высоконапорным СГУ с учетом случайных вариаций параметров при следующих допущениях:

– СГРМ считается стационарной, т.е. случайные вариации параметров происходят медленнее переходных процессов;

– случайные вариации параметров имеют нормальный закон распределения с известными статистическими характеристиками;

– геометрия окон приемной платы считается идеальной;

– давления питания P_n и слива P_c постоянны;

– температура и вязкость рабочей жидкости постоянны;

– отклонение струйной трубки прямо пропорционально сигналу управления;

– коэффициент восстановления расхода в струйной трубке принимается равным $\mu_C = 0,98$;

– утечки в струйном гидрораспределителе компенсируются эжекцией;

– длина гидролиний считается достаточно малой.

Теоретические исследования [1] позволяют учесть влияние взаимодействия прямых и обратных потоков в высоконапорном СГР, заключающееся в конечном счете в том, что насыщение статических характеристик РМ происходит при сигнале управления $j = 0,657$, обезразмеренном относительно максимального.

Существующие исследования [2] позволяют определить коэффициенты восстановления расхода и давления, однако они не учитывают случайного разброса этих коэффициентов, обусловленного, прежде всего, сложным характером распространения высоконапорной компактной струи, сопровождающимся явлениями эжекции и кавитации, величиной противодавления, параметрами пульсаций, микрогеометрией каналов и другими факторами. Выразить аналитически перечисленные зависимости и использовать их при расчете статических характеристик не представляется возможным. Поэтому для построения адекватной математической модели целесообразно перейти к стохастической модели РМ, учитывающей случайный разброс этих коэффициентов и случайный разброс коэффициента неидеальности электрогидравлического струйного распределителя, обусловленный силами сухого трения в гидроцилиндре, гидродинамическим влиянием обратных потоков и технологическими

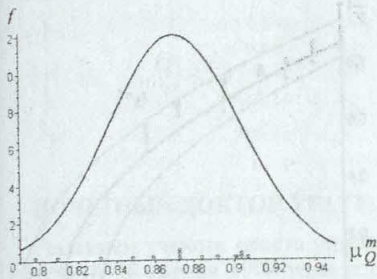


Рис. 1. Плотность распределения вероятности коэффициента восстановления расхода в СГУ μ_Q^m и экспериментальные данные

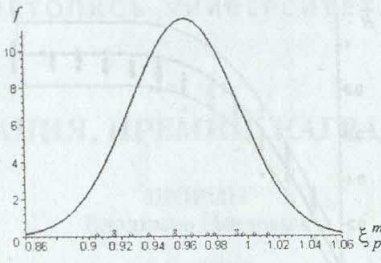


Рис. 2. Плотность распределения вероятности коэффициента восстановления давления в СГУ ξ_p^m и экспериментальные данные

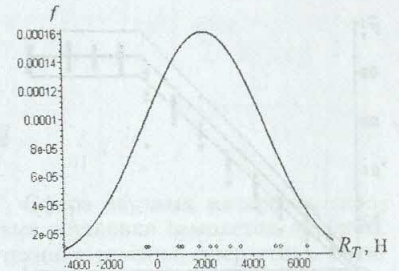


Рис. 3. Плотность распределения вероятности коэффициента неидеальности гидрораспределителя R_T и экспериментальные данные

допусками при регулировке струйной трубки относительно нейтрального положения.

Используя известные формулы теории вероятности, на основании экспериментальных данных определяем:

– математическое ожидание коэффициента восстановления расхода

$$m_\mu = \sum_{n=1}^k \mu_n P_n = 0.8704, \quad (1)$$

где μ_n – случайное значение коэффициента восстановления расхода; P_n – вероятность события;

– дисперсию коэффициента восстановления расхода

$$D_\mu = \sum_{n=1}^k (\mu_n - m_\mu)^2 P_n = 0,001101033; \quad (2)$$

– среднеквадратическое отклонение коэффициента восстановления расхода

$$\sigma_\mu = \sqrt{D_\mu} = 0.0331818; \quad (3)$$

– плотность распределения вероятности коэффициента восстановления расхода

$$f(\mu) = \frac{\exp\left(-\frac{(\mu - m_\mu)^2}{2\sigma_\mu^2}\right)}{\sigma_\mu \sqrt{2\pi}} = \frac{\exp\left(-\frac{(\mu - 0.8704)^2}{0.002202066}\right)}{0.0331818 \sqrt{2\pi}}. \quad (4)$$

График плотности распределения вероятности μ_Q^m представлен на рис. 1.

Задавшись требуемой вероятностью события, в данном случае 0,9, используя функцию Лапласа, определяем границы диапазона изменения $\mu_Q^m = (0,81585...0,92502)$.

Аналогично (1)–(4) на основании экспериментальных данных определяются диапазоны изменения для коэффициента восстановления давления в СГР и коэффициента неидеальности электрогидравлического струйного распределителя: $\xi_p^m = (0.905...1.017)$ и $R_T = (-1428.4...1428.4)$ Н. Графики плотности распределения вероятности для ξ_p^m и R_T представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

После определения стохастических коэффициентов методами математической статистики выражения для определения внешних статических характеристик СГРМ приобретают в безразмерной форме следующий вид:

– скоростная характеристика

$$m_{V_T} = \begin{cases} \frac{m_\mu Q_T}{2A} \left((1 + \bar{i}_k) \sqrt{1 - \frac{m_{R_T}}{A(P_n - P_c)}} - (1 - \bar{i}_k) \sqrt{1 + \frac{m_{R_T}}{A(P_n - P_c)}} \right), & i_k < i_n, \\ \frac{m_\mu Q_T}{A} \sqrt{1 - \frac{m_{R_T}}{A(P_n - P_c)}}, & i_k > i_n; \end{cases} \quad (5)$$

– силовая характеристика

$$m_{R_T} = \begin{cases} \frac{2m_\xi \bar{i}_k}{(1 + \bar{i}_k^2)} (P_n - P_c) - m_{R_T}, & i_k < i_n, \\ m_\xi (P_n - P_c) - m_{R_T}, & i_k > i_n; \end{cases} \quad (6)$$

– механическая характеристика

$$m_V = \begin{cases} \frac{m_\mu Q_T}{2A} \left\{ (1 + \bar{i}_k) \sqrt{1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_{R_T}}{A(P_n - P_c)}} - (1 - \bar{i}_k) \sqrt{1 + \frac{\bar{R}}{m_\xi} + \frac{m_{R_T}}{A(P_n - P_c)}} \right\}, & \bar{i}_k < \bar{i}_n, \\ \frac{m_\mu Q_T}{A} \sqrt{1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_{R_T}}{A(P_n - P_c)}}, & \bar{i}_k > \bar{i}_n, \end{cases} \quad (7)$$

где i_k и i_n – соответственно текущее значение тока управления и значение тока управления, при котором наступает насыщение характеристик РМ; A – эффективная площадь поршня гидроцилиндра; P_n и P_c – давления питания и слива соответственно; R – усилие, развиваемое исполнительным гидродвигателем.

Дисперсию скорости исполнительного гидродвигателя определяем по формуле

$$D_V = \left(\frac{\partial V}{\partial \mu} \right)^2 D_\mu + \left(\frac{\partial V}{\partial R_T} \right)^2 D_{R_T} + \left(\frac{\partial V}{\partial \xi} \right)^2 D_\xi. \quad (8)$$

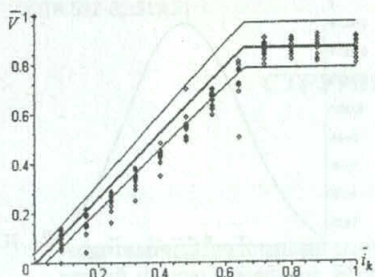


Рис. 4. Скоростная характеристика СГРМ и экспериментальные данные

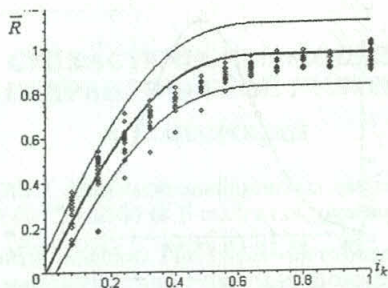


Рис. 5. Силовая характеристика СГРМ и экспериментальные данные

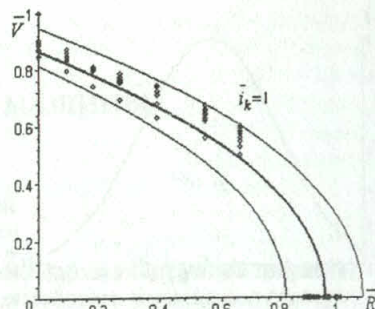


Рис. 6. Механическая характеристика СГРМ и экспериментальные данные

После ряда преобразований (8) можно переписать для случая $\bar{i}_k < \bar{i}_n$ в виде

$$\begin{aligned}
 D_V = & D_\mu \frac{Q_0^2}{4A^2} \left((1 + \bar{i}_k) \sqrt{1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_{RT}}{A(P_n - P_c)}} - \right. \\
 & \left. - (1 - \bar{i}_k) \sqrt{1 + \frac{\bar{R}}{m_\xi} + \frac{m_{RT}}{A(P_n - P_c)}} \right)^2 + \\
 & + D_T \frac{m_\mu^2 Q_T^2}{16A^2} \left(\frac{-(1 + \bar{i}_k)}{\sqrt{1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_{RT}}{A(P_n - P_c)}}} - \right. \\
 & \left. - \frac{(1 - \bar{i}_k)}{\sqrt{1 + \frac{\bar{R}}{m_\xi} + \frac{m_{RT}}{A(P_n - P_c)}}} \right)^2 + \\
 & + D_\xi \frac{m_\mu^2 Q_T^2 \bar{R}^2}{16A^2 m_\xi^4} \left(\frac{(1 + \bar{i}_k)}{\sqrt{1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_{RT}}{A(P_n - P_c)}}} + \right. \\
 & \left. + \frac{(1 - \bar{i}_k)}{\sqrt{1 + \frac{\bar{R}}{m_\xi} + \frac{m_{RT}}{A(P_n - P_c)}}} \right)^2 \quad (9)
 \end{aligned}$$

а для случая $\bar{i}_k > \bar{i}_n$ — в виде

$$\begin{aligned}
 D_V = & D_\mu \frac{Q_T^2}{A^2} \left(1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_T}{P_n - P_c} \right) + \\
 & + D_T \frac{m_\mu^2 Q_T^2}{4A^2} \left(1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_T}{P_n - P_c} \right)^{-1} + \\
 & + D_\xi \frac{m_\mu^2 Q_T^2 \bar{R}^2}{16A^2 m_\xi^2} \left(1 - \frac{\bar{R}}{m_\xi} - \frac{m_T}{P_n - P_c} \right)^{-1} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Задавая значения \bar{i}_k и \bar{R} , можно определить дисперсию скорости гидродвигателя. Так, для проектируемой РМ после подстановки значений параметров в (9)–(10) при $\bar{i}_k = 1$ и $\bar{R} = 0$ находим $D_V = 0,357445 \cdot 10^{-5}$. Среднеквадратическая

ошибка $\sigma_V = 0,00189$. Выражение для определения плотности распределения вероятности события имеет вид

$$f(V) = 211 \exp \left\{ -139881.6 (V - 0.04211)^2 \right\}. \quad (11)$$

На рис. 4–6 представлены статические характеристики СГРМ и приведены результаты эксперимента. Толстой линией на графиках показаны теоретические зависимости без учета случайного разброса коэффициентов восстановления расхода, давления и коэффициента неидеальности электрогидравлического струйного гидрораспределителя; кривые, образующие внешние границы диапазона изменения параметров, построены с учетом стохастичности μ_Q^m , ξ_P^m и неидеальности электрогидравлического струйного распределителя. Погрешность между результатами расчета и экспериментами не превышает в среднем 5%.

Таким образом, методы математической статистики позволяют на основании экспериментальных данных определить стохастические коэффициенты, входящие в выражения статических характеристик СГРМ. Учет этих коэффициентов в стохастической модели СГРМ позволяет более корректно подходить к расчету статических характеристик СГРМ и получать при этом высокую (более 90%) сходимость с результатами экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месропян А. В. Влияние обратных потоков в проточной части на статические характеристики высоконапорного струйного гидрораспределителя // Сб. тр. VIII Всерос. науч.-тех. конф. 26–29 окт. 1998. Пермь: ПГТУ. С. 67–70.
2. Месропян А. В. О коэффициенте восстановления расхода в высокоскоростном СГР // Современные аспекты гидроаэродинамики –98: Сб. докл. междунар. конф. С.-Петербург: СПбГТУ. С. 96.

ОБ АВТОРЕ

Месропян Арсен Владимирович, аспирант каф. прикладной гидромеханики УГАТУ. Дипл. инженер-механик по специальности «Гидромашини, гидроприводы и гидропневмоавтоматика».