

УДК 629.062-82

А. В. МЕСРОПЯН, К. А. ШИРОКОВА, В. А. ЦЕЛИЩЕВ

## МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУЙНО-ЗОЛОТНИКОВОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РУЛЕВОЙ МАШИНЫ

Рассмотрены вопросы математического моделирования струйно-золотниковой гидравлической рулевой машины. Представлена принципиальная схема гидропривода со струйно-золотниковым гидроусилителем, математическая модель и результаты численного моделирования в пакете прикладных программ Maple. Представлена методика идентификации. Математическая модель; идентификация; методика; статистическая обработка; численное моделирование

В настоящее время накоплена обширная база экспериментальных данных по снятию характеристик струйных гидравлических рулевых машин (СГРМ). Важной задачей при проектировании СГРМ является разработка оптимальной методики проектирования, учитывающей результаты обработки, обобщения и анализа экспериментальных данных по снятию статических и динамических характеристик СГРМ.

Критериями, определяющими оптимальность методики, могут выступать адекватные модели, временной фактор, универсальность методики, заключающаяся в возможности моделирования различных компоновочных схем СГРМ.

Применительно к СГРМ конечной целью разработки методики проектирования является потребность в инструментарии, позволяющем быстро и с высокой степенью точности и достоверности рассчитать характеристики и параметры одно- и двухкаскадных схем электрогидроусилителей.

В последнее время весьма популярен метод математического моделирования. Подобие процесса, протекающего в модели, реальному процессу является условием адекватного функционирования модели, и поэтому необходимо исследовать переходные процессы исследуемого объекта и на основе анализа полученных результатов делать выводы о точности, устойчивости и управляемости всей системы в целом.

Близость математической модели реальному объекту обуславливается ее сложностью и более неоднозначно взаимосвязанное влияние различных внешних и внутренних возмущающих факторов, влияющих на ее работо-

способность при исследовании динамических характеристик СГРМ.

Существует два способа формирования математических моделей. Первый способ состоит в том, чтобы разбить систему на такие подсистемы, свойства которых известны. Формальное математическое объединение этих подсистем позволяет получить модель всей системы. Такой подход и называется моделированием. Основной прием сводится к структуризации процесса в виде блок-схем, блоки которых состоят из более простых элементов.

При другом способе построения математической модели непосредственно используются экспериментальные данные. По существу, необходимо по некоторой совокупности параметров, измеряемых в процессе испытаний, воспроизвести недостающие характеристики струйно-золотниковой гидравлической рулевой машины (СЗГРМ) (или иного объекта), установить функциональные зависимости между входными и выходными параметрами, а также получить данные, необходимые для идентификации рулевой машины.

Задача идентификации может быть сформулирована следующим образом [1]. Задан объект, в процессе функционирования которого одновременно могут быть измерены его входная  $x$  и выходная  $y$  переменные. По результатам измерения  $x(t)$  и  $y(t)$  необходимо построить модель заданного объекта, т. е. найти оператор (точнее, его приближенное значение, оценку), ставящий в соответствие выходную  $y(t)$  и входную  $x(t)$  функции. Если характеристикой рассматриваемого объекта является оператор  $A_t$ :

$$y(t) = A_t \cdot x(t), \quad (1)$$



то задача идентификации заключается в определении его оценки  $A_t^*$ , т. е. (см. рис. 1.):

$$y^*(t) = A_t^* \cdot x(t). \quad (2)$$

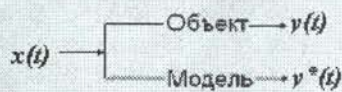


Рис. 1. Схема задачи идентификации

Пусть существует объект и его модель, на входе действует одна и та же переменная  $x(t)$ . Истинным выходом объекта является  $y(t)$ , а на выходе модели  $y^*(t)$ .

Очевидно, что модель «беднее» реальной действительности, что и определяет существующие различия между  $y(t)$  и  $y^*(t)$ . Задача идентификации заключается в том, чтобы по реализациям  $x(t)$  и  $y(t)$  найти оценку  $A_t^*$  истинного оператора  $A_t$ .

Таким образом, идентификация позволяет спроектировать СЗГРМ с параметрами, при которых достигается близость характеристик реальной установки и характеристик, построенных при помощи математического моделирования на ЭВМ с учетом экспериментальных данных. Этапы процедуры идентификации представлены на рис. 2.

Методику идентификации СЗГРМ можно представить как совокупность следующих этапов:

- формулирование цели и задач исследования;
- составление принципиальной схемы рулевой машины;
- описание принципа действия СЗГРМ и основных физических процессов происходящих в рулевой машине;
- выбор структуры модели;
- выбор параметров, которые задаются;
- выбор параметров, которые необходимо определить;
- расчет статических и динамических характеристик;

- статистическая обработка результатов экспериментов;
- построение стохастической математической модели;
- анализ полученных результатов и выдача рекомендаций по проектированию и доводки рулевых машин.

Основными элементами СЗГРМ являются: электромеханический преобразователь (ЭМП), струйный гидрораспределитель (СГР), золотниковый гидрораспределитель (ЗГР) и гидродвигатель. На рис. 3 представлена принципиальная схема струйно-золотникового гидроусилителя. Электрический управляющий сигнал, преобразованный и усиленный в промежуточных устройствах автоматики, поступает в ЭМП. Якорь ЭМП смещается на угол  $\alpha$ , поворачивая в ту или иную сторону струйную трубку, сопло которой перекрывается с приемными окнами распределителя — приемной платы, что приводит к возникновению перепада давлений в золотнике. Когда сигнал датчика будет скомпенсирован сигналом цепи обратной связи, струйная трубка вернется в исходное положение.

На рис. 4, 5, 6 представлены основные компоненты двухкаскадной схемы струйно-золотникового гидроусилителя (СЗГУ).

Объем полости струйной камеры между срезами питающего сопла и приемного канала обычно намного меньше суммарного объема жидкости в полостях гидропривода. Влияние локальных изменений скорости на участке между срезами сопла и канала также незначительно (рис. 5). Поэтому при анализе динамических свойств струйно-золотникового гидроусилителя можно пренебречь сжатием и инерционностью жидкости на участке между срезами питающего сопла и приемного канала.

На рис. 7, 8 для большей наглядности процессов и явлений, происходящих в проточной части гидроусилителя, представлена область расчета СЗГУ.

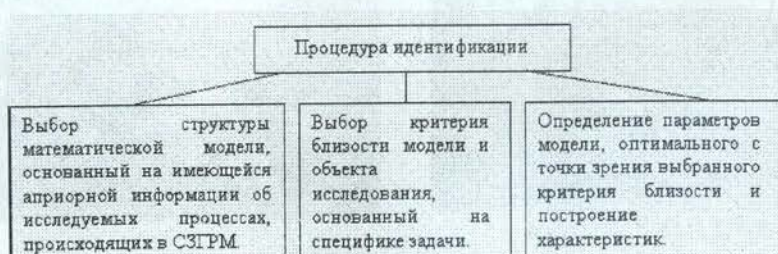


Рис. 2. Этапы процедуры идентификации



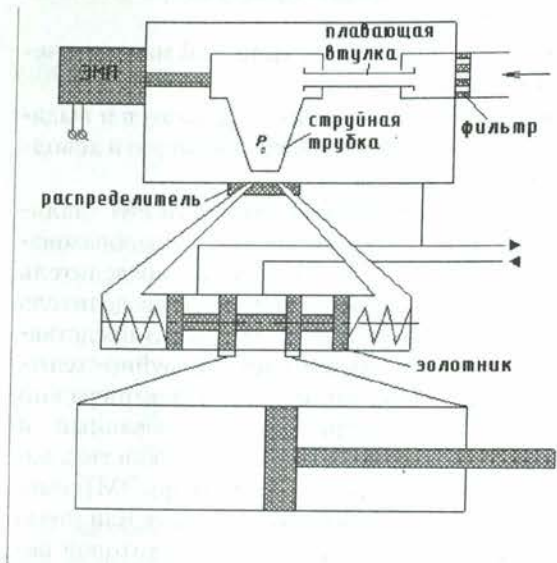


Рис. 3. Принципиальная схема СГРМ со струйно-золотниковым гидроусилителем

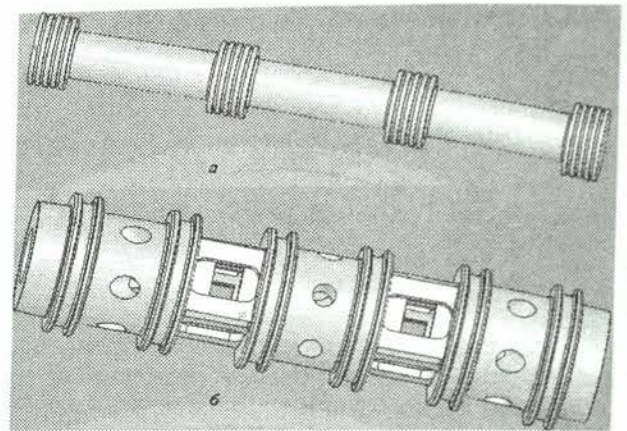


Рис. 6. Золотниковый каскад управления: а — золотник, б — гильза золотника

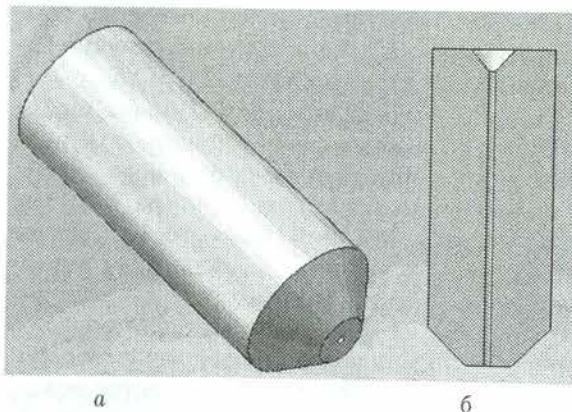


Рис. 4. Струйная трубка: а — в изометрии, б — в разрезе

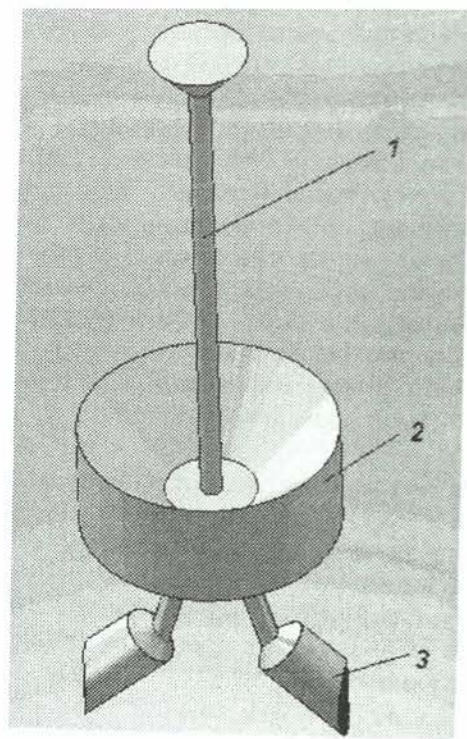


Рис. 7. Проточная часть струйного каскада: 1 — струйная трубка, 2 — камера распространения струи, 3 — приемная плата

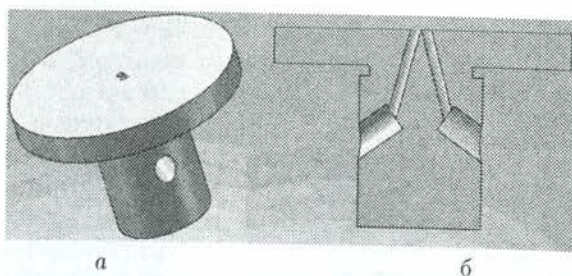


Рис. 5. Приемная плата струйного каскада: а — в изометрии, б — в разрезе

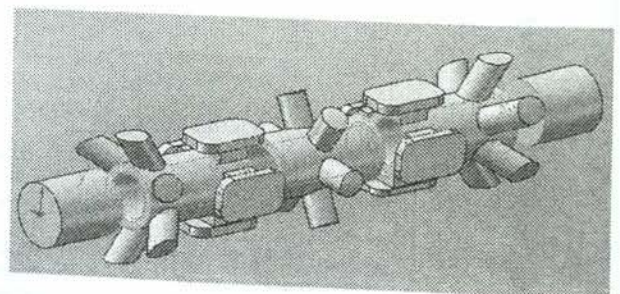


Рис. 8. Проточная часть золотникового каскада



Построение в реальном масштабе элементов СЗГУ в пакете прикладных программ Solid Works (рис. 4–9) позволяет рассчитать массу и объемы полостей элементов, необходимых для математического моделирования.

Выбор структуры модели позволяет определить перечень параметров, задаваемых при идентификации и перечень параметров, определяемых при идентификации (см. табл. 1), после чего производится расчет статических и динамических характеристик СЗГРМ.

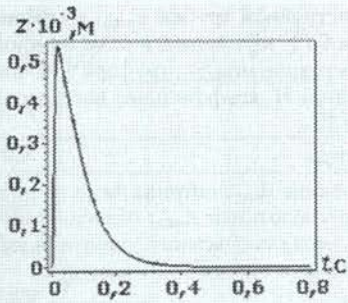


Рис. 9. Перемещение струйной трубки

Поскольку в процессе численного моделирования необходимо обеспечить максимальную степень адекватности математической модели реальному объекту, линейные модели не рассматриваются, так как они не дают полноценного представления о работе системы при скоростях и усилиях, близких к критическим (максимальным).

Математическая модель СГРМ со струйно-золотниковым гидросилителем включает следующие уравнения.

Уравнение моментов, действующих на якорь ЭМП, определяется формулой [4]:

$$J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = K_{mi} \cdot I - K_{ma} \cdot \alpha - b \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

Уравнение электрической цепи ЭМП:

$$\begin{cases} U = R_{emp} \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + K_{pe} \cdot \frac{d\alpha}{dt}; \\ U = K_u \cdot (U_e - K_{oc} \cdot y(t)). \end{cases} \quad (4)$$

Условием баланса является равенство расходов на выходе из СГР и расхода в ЗГР

$$A_{зол} \frac{dx_{зол}}{dt} + \left( \frac{W_0}{2 \cdot E} \right) \frac{dP_d}{dt} =$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2} \mu_Q^m \left[ (1 + \bar{z}) \sqrt{1 - \frac{\bar{P}_d}{\xi_p^m}} - \right. \\ \left. - (1 - \bar{z}) \sqrt{1 - \frac{\bar{P}_d}{\xi_p^m}} \right], & \bar{z} \leq \bar{z}_n; \\ \mu_Q^m \sqrt{1 - \frac{\bar{P}_d}{\xi_p^m}}, & z_{max} > \bar{z} > \bar{z}_n. \end{cases} \quad (5)$$

Для золотникового гидрораспределителя уравнение сил и баланса расходов выглядят следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} M_x \cdot \left( \frac{d^2}{dt^2} x_{зол}(t) \right) &= A_{зол} \cdot P \cdot dx_{зол}(t) - \\ &- b_e \cdot \left( \frac{d}{dt} x_{зол}(t) \right) - Cx \cdot x_{зол}(t) - \\ &- F_{трx} - C_{гд} \cdot x_{зол}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_y \frac{dy}{dt} + \left( \frac{W_0}{2 \cdot E_d} \right) \frac{dP_d}{dt} &= \\ &= \mu_x \cdot x_{зол}(t) \cdot b_{ок} \cdot \left( \frac{2 \cdot (P_p - P_c)}{\rho} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение движения нагрузки [4]:

$$\begin{aligned} M \cdot \frac{d^2y}{dt^2} &= A \cdot P_d - R - \\ &- C_n \cdot y - b_n \cdot \frac{dy}{dt} - F_{тр}, \end{aligned} \quad (8)$$

В пакете прикладных программ Maple были построены переходные процессы СЗГРМ: перемещение струйной трубки, золотника и выходного звена – гидродвигателя и их скорость (рис. 9–14). Построен фазовый портрет рулевой машины, описывающий поведение всей системы и наглядно определяющий положение элементов гидросилителея (рис. 15, 16).

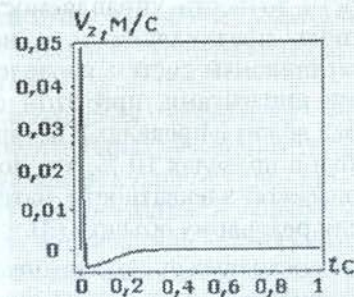


Рис. 10. Скорость перемещения струйной трубки



Параметры, задаваемые при идентификации	Параметры, определяемые при идентификации
электромеханический преобразователь	
входное напряжение $U$ , индуктивность управляющей обмотки $L$ , активное сопротивление управляющей обмотки $R_{\text{этр}}$ , коэффициент усиления усилителя по напряжению $K_U$ , коэффициент противо-ЭДС $K_{\text{ре}}$ , коэффициент главной обратной связи $K_{\text{ос}}$ , угол поворота якоря ЭМП $\alpha$ , коэффициент вязкого трения $b$ , момент инерции якоря ЭМП $J$ , сигнал рассогласования $U_e$ , максимальный момент якоря ЭМП $M_{\text{max}}$ ;	управляющий ток ЭМП $I$ , коэффициент моментной характеристики $K_{mi}$ , коэффициент жесткости магнитной пружины $K_{ma}$ ;
гидрораспределитель «струйная трубка-приемная плата»	
теоретический расход через струйную трубку $Q_T$ , длина струйной трубки $l$ , плотность рабочей жидкости $\rho$ , перемещение струйной трубки, при котором наступает насыщение характеристик СГРМ $z_n$ ;	диаметр сопла струйной трубки $d$ , максимальное перемещение струйной трубки $z_{\text{max}}$ , коэффициент расхода в СГУ $\mu_Q^m$ , диаметр окна приемной платы $d_n$ , расстояние между струйной трубкой и приемной платой $H$ , коэффициент восстановления давления $\xi_p^m$ ;
золотниковый гидрораспределитель	
величина позиционной нагрузки на золотнике $M_x$ , масса золотника $M_x$ , сила вязкого трения $b_e$ , сила сухого трения $F_{\text{трx}}$ , коэффициент расхода золотника $\mu_x$ , давление питания $P_p$ ; давление слива $P_c$ ;	диаметр золотника $d_{\text{зол}}$ ; ширина окна золотника $b_{ок}$ ; площадь золотника $A_{\text{зол}}$ ; гидродинамическая сила $C_{\text{гд}}$ ; модуль объемной упругости рабочей жидкости в золотнике $E$ ;
исполнительный гидродвигатель (гидроцилиндр)	
коэффициент жесткости стенок гидроцилиндра $C_{ж}$ ; сила сухого трения в гидроцилиндре $F_{\text{тр}}^n$ ; коэффициент вязкого трения поршня гидроцилиндра $b_n$ ; масса поршня, гидроцилиндра и рабочей жидкости $m$ ; скорости, развиваемые СГРМ под нагрузкой и на холостом ходу; приведенная масса нагрузки $M$ ; статическая нагрузка $R$ ; позиционная нагрузка $C_n$ ; коэффициент жесткости проводки $N_n$ ; коэффициент вязкого трения нагрузки $b$ ; усилие на штоке гидроцилиндра $R$ ;	эффективная площадь гидродвигателя $A$ ; сила сухого трения в гидроцилиндре $F_{\text{тр}}$ ; модуль объемной упругости рабочей жидкости в гидродвигателе $E_d$ ;

Основные параметры гидроусилителя следующие:  $I = 0,25$  А,  $M = 20$  кг, давление питания в системе  $P_p = 20$  МПа, давление питания первого каскада управления  $P_{pz} = 0,2$  МПа, расход в системе  $Q = 0,0005$  м<sup>3</sup>/с, расход в струйной трубке  $Q = 0,00005$  м<sup>3</sup>/с,  $U = 30$  В.

Результаты численного моделирования показывают, что представленные характеристики отвечают основным требованиям по устойчивости, точности, управляемости и быстродействию, предъявляемым к исполнительным механизмам систем управления летательными аппаратами, при этом статическая ошибка лежит в пределах 3 %, динамическая ошибка в пределах 10 %, что позволяет судить о высокой адекватности математической модели реальному объекту [3].

Анализ переходных процессов показывает, что характеристики имеют зоны неустойчивости, что связано с неоднозначным определением коэффициентов уравнений. В подоб-

ной ситуации необходимо провести дополнительную статистическую обработку экспериментальных данных для доопределения неоднозначных коэффициентов.

Уточнение математического описания рулевых приводов целесообразно проводить с использованием результатов экспериментальных исследований, основной задачей которых является определение так называемых «недоопределенных» параметров СГРМ. По существу, необходимо по некоторой совокупности параметров, измеряемых в процессе испытаний, воспроизвести недостающие характеристики СГРМ, установить функциональные зависимости между входными и выходными параметрами, а также получить данные, необходимые для идентификации объекта.



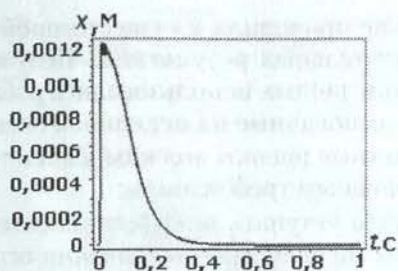


Рис. 11. Перемещение золотника

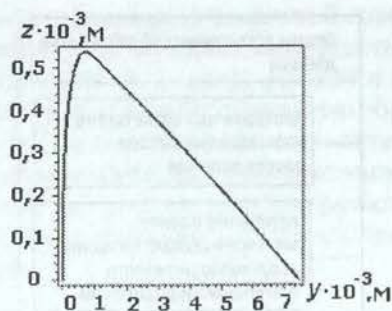


Рис. 15. Фазовый портрет гидроусилителя

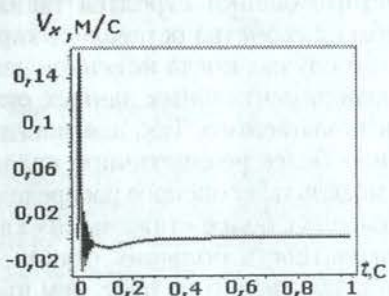


Рис. 12. Скорость перемещения золотника

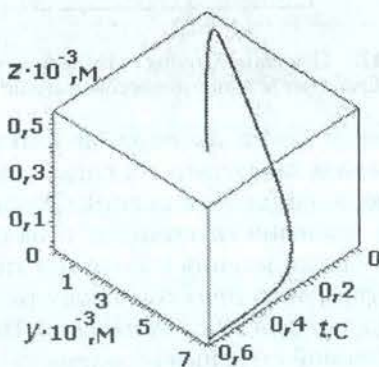


Рис. 16. Фазовый портрет гидроусилителя во времени

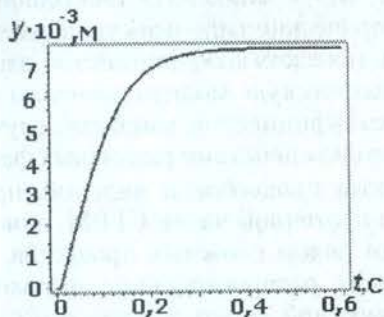


Рис. 13. Перемещение гидроцилиндра

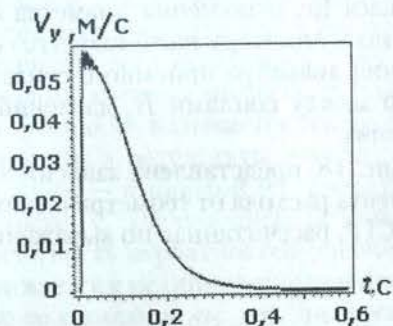


Рис. 14. Скорость перемещения гидроцилиндра

Статистическая обработка позволяет исключить или минимизировать случайные погрешности, характеризующиеся суммарным воздействием большого числа различных факторов, и вызывающие рассеяние параметров вокруг центра группирования, построить зависимости на основе найденных в результате обработки оценок неизвестных параметров и определить степень достоверности полученных результатов. Учет статистического разброса параметров рулевых машин при численном моделировании позволяет, в конечном итоге, разработать математическую модель с высокой степенью адекватности реальному объекту.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований проводится следующими этапами (рис. 17). Основному этапу статистической обработки — проверке на соответствие нормальному закону распределения предшествует теоретический (качественный) анализ имеющихся данных с учетом процессов и явлений, влияющих на разброс параметров.



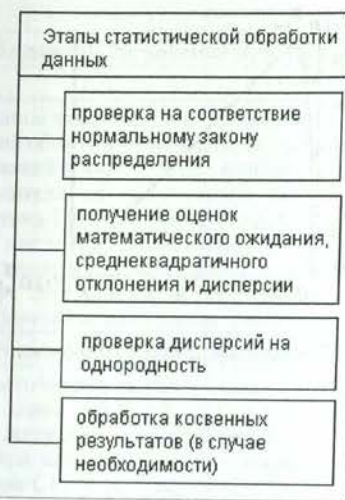


Рис. 17. Основные этапы статистической обработки результатов эксперимента

Основная схема проведения статистического анализа заключается в следующем: полученную в результате эксперимента совокупность значений группируют и на основании вида распределения выдвигают гипотезу о конкретном теоретическом законе распределения. Далее, пользуясь критерием Пирсона с определенной степенью надежности, проверяют эту гипотезу и определяют параметры гипотетического закона распределения рассеяния отклонений. Затем, пользуясь тестом Бартлетта, проверяют гипотезу о постоянстве дисперсий и определяют характеристики смещения центра распределения. Однако следует отметить, что на практике критерий Пирсона применяется достаточно редко, так как при выборке небольшого объема он не дает полной картины и приходится использовать другие критерии для оценки распределения [2].

Использование классического подхода к обработке данных основано на принятии гипотезы о соответствии распределения этих данных какому-либо закону распределения. Как правило, таким законом является нормальный закон распределения, поскольку при стремлении количества данных к бесконечности все известные законы распределения стремятся к нему. Специфика производства и эксплуатации СГРМ не позволяет получать большие объемы экспериментальных данных (выборка не превышает 10–20 значений), поэтому о строгом соответствии распределения опытных данных какому-либо закону говорить затруднительно. В связи с этим возникает необходимость разработки методов обработки, нечувствительных к отклонениям от классических статистических моделей, т. е. таких, чтобы малая ошибка в математической

модели не приводила к существенной ошибке окончательных результатов. Поэтому для обработки данных использовались робастные методы, основанные на медианной оценке [5].

Робастные оценки должны удовлетворять двум основным требованиям:

1) мало уступать в эффективности оптимальным оценкам при выполнении основной модели, когда распределение действительно является гауссовским;

2) оставаться достаточно «хорошими» при отклонениях от основной модели, когда распределение отлично от гауссовского.

Робастные оценки строятся таким образом, чтобы их свойства оставались хорошими даже в том случае, когда истинное распределение экспериментальных данных отличается от предполагаемого. Так, для многих наборов данных более реалистичной является не строгая модель гауссовского распределения, а распределения с более «тяжелыми» хвостами (когда вероятность больших отклонений от среднего существенно больше, чем при гауссовском распределении).

Обработка, обобщение и анализ экспериментальных и теоретических исследований СГР, проводимых совместно ФГУП «Государственный ракетный центр — КБ им. акад. В. П. Макеева» позволили вывести эмпирические зависимости по расчету ряда стохастических коэффициентов, входящих в математическую модель рулевого привода, т. е. коэффициентов, имеющих случайный разброс в силу действия различных факторов.

Природа процессов и явлений, происходящих в проточной части СГРМ, описывается целым рядом сложных процессов, сопровождающих распространение высоконпорной скоростной струи в камере ограниченных размеров. В какой-то степени картину течения можно охарактеризовать коэффициентом расхода  $\mu_Q^m$  — отношением максимального расхода через гидродвигатель к расходу через струйную трубку. Он зависит от числа Рейнольдса  $Re$ , отношения диаметра приемного сопла к диаметру нагнетающего сопла  $\bar{d}$ , отношения диаметра приемного сопла к расстоянию между соплами  $\bar{H}$ , давлений питания и слива.

На рис. 18. представлена зависимость коэффициента расхода от геометрических параметров СГР, рассчитанная по выражению

$$\mu_Q^m = -0,375 \cdot \left( \frac{\bar{H}^2}{\bar{d}} \right)^{0,2} + 0,769 - 0,023 \times$$



$$\times \frac{\bar{H}}{d^2} + 0,329 \cdot H \sqrt{\frac{\bar{d}}{H}} + 0,203 \cdot \left(\frac{\bar{d}}{H}\right)^{\frac{H}{d}} \quad (9)$$

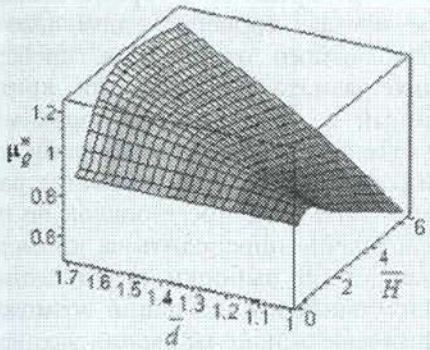


Рис. 18. Коэффициент расхода в СГУ

Погрешность между результатами расчета по эмпирической зависимости и экспериментами не превышает в среднем 3%. Эмпирическая зависимость коэффициента расхода от безразмерных конструктивных параметров позволяет оптимизировать выбор наиболее рациональных геометрических параметров СГР.

Экспериментальные данные ФГУИ «Государственный ракетный центр — КБ им. акад. В. П. Макеева» по коэффициенту расхода представлены на рис. 19.

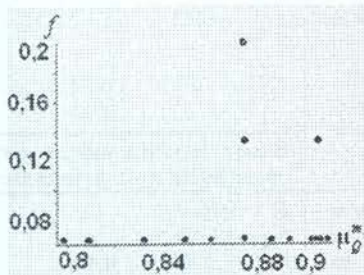


Рис. 19. Экспериментальные данные коэффициента расхода

Проведем статистическую обработку результатов экспериментальных исследований. Совокупность всех испытаний и результатов наблюдений, которые могут быть получены в данных условиях, называется генеральной совокупностью, а результаты, полученные при испытаниях, — выборкой из генеральной совокупности. С увеличением объема выборки  $n$  плотность вероятностей оценки  $f(m, n)$  приближается к истинному значению математического ожидания  $m$ , т. е. дисперсия оценки с ростом объема выборки стремится к нулю (рис. 20) [1]. В реальных условиях вы-

борка всегда меньше генеральной совокупности, поэтому необходимо определить достоверные оценки. Эту задачу решают в два этапа. Сначала производят первичную обработку результатов испытаний, при этом определяют эмпирические функции распределения и статистики, а затем теоретические функции распределения с помощью различных критериев согласия.

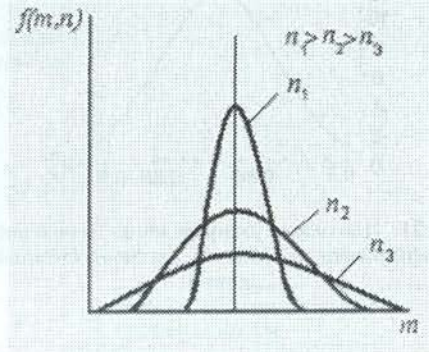


Рис. 20. Зависимость дисперсии оценки от объема выборки

Первичную обработку результатов измерений выполняют методами математической статистики, в результате чего получают статистические оценки (математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, плотность распределения вероятности и т. д.). Для оценки совпадения (согласия) эмпирических и теоретических статистик применяют различные критерии согласия. Наиболее распространенными и эффективными являются статистические критерии Пирсона, Колмогорова и Стьюдента [1, 2].

Известные труды теории вероятности позволяют определить на основании экспериментальных данных математическое ожидание  $\mu_Q^m$ , дисперсию величины, среднее квадратичное отклонение  $\mu_Q^m$ , плотность распределения вероятности, с помощью функции Лапласа при заданной вероятности события определяются границы диапазона изменения, и характеристики СГРМ представляют уже не кривые, а области значений [1, 2].

Функция распределения вероятностей дает полную вероятностную характеристику ее поведения. Плотность распределения вероятности рассчитывается исходя из закона нормального распределения вероятности события, поскольку этот закон позволяет описывать исследуемые параметры объекта исходя из появления постепенных отказов, связанных с протеканием процессов старения, износа, накоплением усталостных повреждений и т. д.



График плотности распределения вероятности коэффициента расхода  $\mu_Q^n$  в соответствии с нормальным законом распределения представлен на рис. 21.

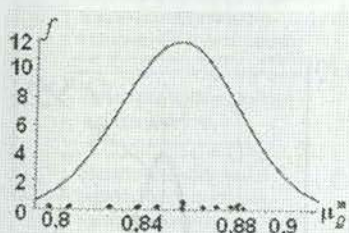


Рис. 21. Плотность распределения вероятности коэффициента расхода и экспериментальные данные

В табл. 2 представлены основные методы проверки экспериментальных данных нормальному распределению.

Для оперативной оценки гипотезы нормальности распределения применялись следующие методы: проверка с помощью среднего абсолютного отклонения, проверка с помощью размаха варьирования, критерий, основанный на сравнении выборочных моментов с генеральными параметрами, критерий Пирсона и т. д. Использование различных критериев и экспресс-оценок не позволяет однозначно определить на примере одной конкретной выборки результатов экспериментальных исследований возможность и правомерность использования закона нормального распределения при статистической обработке.

Таблица 2

1	2	3	4
Наименование метода	Основные уравнения	Обработка коэффициента расхода при $n = 15$	Вывод
1	Проверка с помощью среднего абсолютного отклонения (CAO)	$CAO = \frac{\sum  x_i - \bar{x} }{n}$ где: $n$ — объем выборки; $\bar{x}$ — среднее выборки. $\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ Гипотеза нормальности подтверждается, если $\left  \frac{CAO}{\bar{S}} - 0,7979 \right  < \frac{0,4}{\sqrt{n}}$	$CAO = 0,593 \cdot 10^{-9}$ $\bar{S} = 0,267$ $0,7979 < 0,1633$
	Выборка: $n > 120$		Вывод: условие нормальности распределения не подтверждается
2	Быстрая проверка гипотезы нормальности распределения осуществляется с помощью размаха варьирования $R$	Из экспериментальных данных выбираются максимальная и минимальная величины и вычисляется размах варьирования данной выборки $R =  x_{\max} - x_{\min} $ . среднее значение в выборке и среднеквадратичное отклонение $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ Гипотеза нормальности распределения подтверждается при $\left[ \frac{R}{\bar{S}} \right]_i < \left[ \frac{R}{\bar{S}} \right] < \left[ \frac{R}{\bar{S}} \right]_a$ , где нижнее и верхнее граничные значения берутся из таблицы [1] в зависимости от величины выборки $n$ и уровня значимости $p$ .	$R = 0,1091$ , $S = 0,2582$ , $0,43 < 0,4224 < 0,45$
	Выборка $3 < n < 10000$		Вывод: условие выполняется не полностью или экспериментальные данные не подчиняются закону нормального распределения



Окончание табл. 2

1	2	3	4
3	Выборка $3 < n < 10000$ Критерий, основанный на сравнении выборочных моментов с генеральными параметрами	Вычисляются оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичные отклонения, выборочные коэффициенты эксцесса и асимметрии $\gamma_1 = \frac{1}{n \cdot \sigma^3} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{\mu})^3;$ $\gamma_2 = \frac{1}{n \cdot \sigma^4} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{\mu})^4 - 3.$ Распределения этих оценок сложны и малоизучены, обычно известны дисперсии этих величин $\sigma^2(\gamma_1) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)},$ $\sigma^2(\gamma_2) = \frac{24 \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)},$ Наблюдаемое распределение можно считать нормальным при $ \gamma_1  \leq 3 \cdot \sqrt{\sigma^2(\gamma_1)},$ $ \gamma_2  \leq 5 \cdot \sqrt{\sigma^2(\gamma_2)}.$	$\mu = 0,87044, D = 0,0011, \sigma_{\mu} = 0,033,$ $\gamma_1 = -0,8916, \gamma_2 = -0,2255,$ $\sigma^2(\gamma_1) = 0,54006,$ $\sigma^2(\gamma_2) = 0,20156,$ $0,8916 \leq 0,66317$ $0,2255 \leq 0,5269.$
	Выборка $n > 20$		Вывод: условие нормальности не подтверждается
4	Критерий согласия Пирсона	Рассчитываются эмпирические частоты $\nu = \frac{p_i}{n},$ где $p_i$ — вероятность выпадения данного значения, $n$ — количество данных. Рассчитывается вероятность событий по правилу трех сигм, а также теоретические частоты $\omega = p_i \cdot \frac{p_i}{n}.$ Определяются $k$ — число степеней свободы, $r$ — число параметров предполагаемого распределения. По таблице для заданного уровня значимости и при известном числе степеней свободы определяется значение $\chi^2.$ Определяются значения $x_n = \left  \sum_{i=1}^n \frac{\nu - \omega}{\omega} \right , \quad x_l = \left  \sum_{i=1}^n \frac{\nu^2}{\omega} \right $ Гипотеза принимается при $x_n < \chi^2$ и при $x_l < \chi^2.$	$k = 2, r = 12$ $p = 0,9973$ $\chi^2 = 21$ $x_n = 0,828 \cdot 10^{-5} x_l = 13,864$ $0,8284 \cdot 10^{-5} < 21, 13,864 < 21$
			Вывод: условие нормальности не подтверждается

Поэтому с помощью численного моделирования на ЭВМ удалось сравнить статистические характеристики СГРМ с классической оценкой — средним арифметическим и характеристиками, построенными с помощью робастных методов, основанных на медианной оценке.

Разброс обобщенных характеристик при различных методах статистической обработки коэффициента расхода доказывает важность проводимых исследований. Проводимые исследования выявили оптимальный метод статистической обработки, при котором наблюдается близость результатов экспериментальных исследований и численного моделирования с применением робаст-

ных методов, основанных на медианной оценке (см. рис. 22).

Завершающим этапом идентификации СЗГРМ является расчет характеристик стохастической СЗГРМ

На первом уровне идентификации динамических характеристик СГРМ учитывается случайный разброс одного параметра — коэффициента расхода  $\mu_Q^m$  в СГУ. На следующих этапах разрабатываются модели, учитывающие случайный разброс двух стохастических параметров — коэффициента расхода  $\mu_Q^m$  и коэффициента восстановления давления  $\xi_R^m$  в СГУ.

В результате построения стохастических математических моделей, характери-



стики рулевой машины представляют собой не кривые, а диапазон изменения значений с заданной степенью вероятности событий (см. рис. 23, 24).

стики рулевой машины представляют собой не кривые, а диапазон изменения значений с заданной степенью вероятности событий (см. рис. 23, 24).

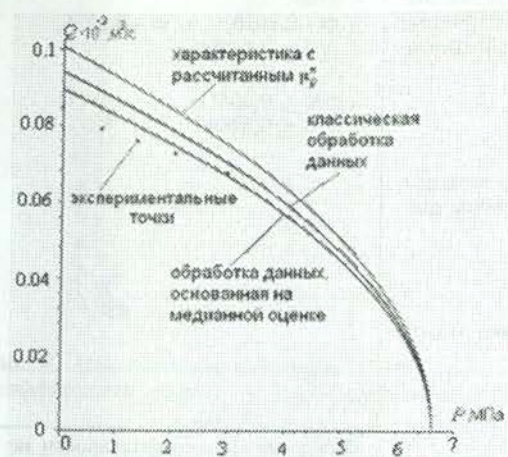


Рис. 22. Сравнение обобщенных характеристик с экспериментальными данными

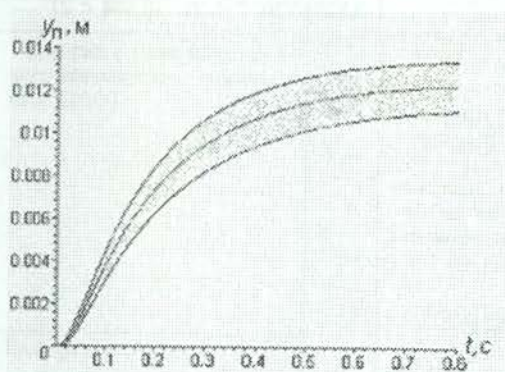


Рис. 23. Перемещение поршня гидроцилиндра

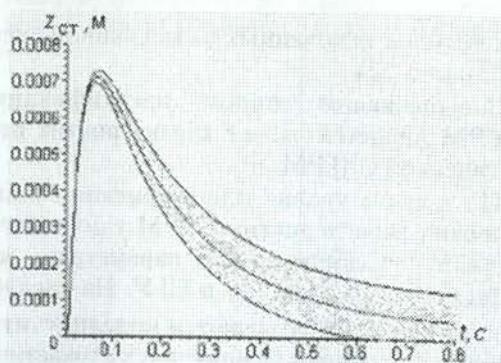


Рис. 24. Скорость перемещения струйной трубки

В результате построения стохастических математических моделей, характери-

В работе представлена методика идентификации струйно-золотниковой гидравлической рулевой машины, направленная на оптимизацию процессов проектирования рулевых приводов, которая позволит снизить финансовые и временные затраты на этапе проектирования объекта. Можно отметить следующее:

- ряд параметров СЗГРМ не поддавался аналитическому описанию из-за отсутствия теоретических исследований в области проектирования высоконапорных рулевых машин, а также из-за сложных гидродинамических процессов, протекающих в проточной части рулевой машины. Поэтому в работе был использован метод идентификации, при котором математическая модель строится по результатам экспериментов или данным;

- на этапе выбора параметров, задаваемых при идентификации, определяются стохастические коэффициенты, входящие в математическую модель рулевого привода, т. е. коэффициенты, имеющие случайный разброс в силу действия различных факторов;

- выбраны параметры, позволяющие рассчитать математическую модель и построить переходные процессы рулевой машины. Анализ переходных процессов показывает, что характеристики имеют зоны неустойчивости, что связано с неоднозначным определением коэффициентов уравнений. В подобной ситуации необходимо провести дополнительную статистическую обработку экспериментальных данных для доопределения неоднозначных коэффициентов;

- выбран оптимальный метод обработки экспериментальных данных и проведена статистическая обработка результатов экспериментальных исследований по расчету стохастических коэффициентов;

- разработана стохастическая математическая модель, учитывающая разброс параметров СЗГРМ с заданной степенью вероятности события.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валеева, О. В.** Низкотемпературные твердо-топливные газогенераторы: методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования / О. В. Валеева, С. Д. Ваулин [и др.]. Миасс : ГРЦ «КБ им. академика В. П. Максеева», 1997. 268 с.
2. **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. М. : Высшая школа, 1977. 479 с.
3. **Кириллов, Ю. К.** Струйные гидравлические рулевые машины (теоретические основы рабочих процессов) / Ю. К. Кириллов, А. М. Русак, Ю. Н. Скорынин [и др.]. Уфа : УГАТУ, 2002. 284 с.
4. **Месропян, А. В.** Численное моделирование характеристик струйно-золотниковых гидросилителей / А. В. Месропян, К. А. Широкова // Гидропневмоавтоматика и гидропривод-2005 : сб. науч. тр. Т. 1. Ковров : КГТА, 2006. 326 с.
5. **Широкова, К. А.** Использование статистических методов при проектировании струйных гидравлических рулевых машин / К. А. Широкова // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей : межвуз. сб. науч. статей. Уфа : УГАТУ, 2006. № 21. С. 171–177.

## ОБ АВТОРАХ



**Месропян Арсен Владимирович**, доцент каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук по системам приводов (Пермск. гос. тех. ун-т, 2000). Иссл. в обл. гидроприводов систем управления ЛА.



**Широкова Ксения Александровна**, асп. той же каф. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2004) и магистр (там же, 2006) по энергомашиностроению. Готовит дис. в обл. систем автоматизации двиг. установок.



**Целищев Владимир Александрович**, проф. той же каф. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматизации ЛА и двигательных установок.