

## К ВОПРОСУ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

М. О. Митягина<sup>1</sup>, Р. Р. Шарипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>teor\_mech@mail.ru, <sup>2</sup>obter@ya.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 14.05.2021

**Аннотация.** Предложен подход к идентификации параметров электрогидравлического привода систем управления летательными аппаратами. Описывается математическая модель электрогидравлического привода, включающая в себя модель электро-механического преобразователя, модель гидравлического усилителя и модель исполнительного гидродвигателя с полезной нагрузкой. В качестве методов идентификации рассматриваются метод градиентного спуска и метод равномерного поиска. Приводятся результаты идентификации коэффициента расхода электрогидравлического привода.

**Ключевые слова:** электрогидравлический привод; математическая модель; идентификация; метод градиентного спуска; испытания гидропривода.

### ВВЕДЕНИЕ

Электрогидравлический привод является важным исполнительным звеном систем управления (СУ) летательными аппаратами. Широкое применение электрогидравлический привод (ЭГП) в СУ получил вследствие наибольшей энергоемкости с точным позиционированием и высоким быстродействием среди других типов приводов.

В настоящее время при моделировании характеристик ЭГП используются модели на основе уравнений математической физики и эмпирических соотношений [1–3]. Однако, большинство параметров не поддаются априорному вычислению, вследствие чего особое значение приобретает параметрическая идентификация моделей ЭГП для решения задач по моделированию, оптимизации и синтезу регуляторов СУ.

Отдельно стоит отметить задачу по идентификации работы алгоритмов адаптивного и оптимального управления, отвечающих за распознавание параметров в процессе эксплуатации ЭГП и адаптацию СУ под эти изменения. Зачастую эти параметры и модели не относятся к физике процессов, но в полной мере описывают динамику привода [4].

В большинстве случаев идентификация неизвестных или изменяющихся параметров ЭГП с помощью классических методов математической статистики затруднена, что объясняется нелинейностью их характеристик. Одним из возможных решений является использование метода идентификации с применением аппарата матричных операторов [5]. Данный метод накладывает ограничения на некоторые функции, что обуславливает его редкое применение при инженерных расчетах.

В настоящей работе предлагается подход к решению задачи параметрической идентификации на основе экспериментальных данных для нелинейной модели электрогидравлического привода методом минимизации квадрата ошибки.

Предлагаемый подход основывается на численном решении математической модели привода с заданным диапазоном идентифицируемых параметров ЭГП.

При разработке и проектировании сложных электрогидромеханических устройств возникает потребность точного математического описания процессов, имеющих место при эксплуатации ЭГП. В ряде случаев, руководствуясь простыми апробированными физическими соотношениями, имеет место априорное математическое представление, определяющее структуру объекта. Однако параметры объекта редко устанавливаются с высокой точностью: часть параметров задаются доверительными интервалами в связи с технологическими допусками при изготовлении, часть – являются времязависимыми как в большом (износ), так и в малом (внешняя нагрузка, внутренние источники питания) времени, часть – являются стохастическими. Идентификация параметров сложных объектов управления, включающих подсистемы электрического, гидравлического и механического преобразования энергии на основе численного моделирования и полученных с помощью экспериментальных исследований, является актуальной инженерной задачей.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

На данный момент разработаны математические модели ЭГП, основанные на физических законах и позволяющие моделировать статические и динамические характеристики системы на любом этапе функционирования.

Общая модель электрогидравлического привода включает в себя:

- модель электромеханического преобразователя (ЭМП);
- модель гидравлического усилителя;
- модель исполнительного гидродвигателя с полезной нагрузкой.

Параметры ЭМП описываются уравнением электрической цепи с учетом индуктивных и диссипативных членов и уравнением суммирования сигналов управления и ошибки

$$U = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + K_{emf} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}, \quad (1)$$

$$U = U_{com} - K_{fb} \cdot y(t), \quad (2)$$

где  $U$  – перепад напряжения на обмотках управления ЭМП, В;  $R$  – сопротивление обмоток управления, Ом;  $i(t)$  – ток обмотки управления, А;  $L$  – индуктивность, Гн;  $K_{emf}$  – коэффициент противо-ЭДС, В·с/рад;  $\alpha(t)$  – угол поворота струйной трубки, рад;  $U_{com}$  – напряжение сигнала управления, В;  $K_{fb}$  – коэффициент главной обратной связи по положению гидроцилиндра, В/м;  $y(t)$  – положение гидроцилиндра, м.

Параметры сопротивления и индуктивности, определяемые паспортными данными на изделие, также могут иметь некоторые допускаемые отличия в связи с технологическими особенностями. Коэффициент противо-ЭДС, характеризующий появление электродвижущей силы и действующей против силы тока, принимают равным постоянной момента. Сигнал управления задает начальное смещение струйной трубки – суммирование сигнала положения гидроцилиндра обеспечивает смещение струйной трубки относительно нейтрального положения до отработки сигнала управления.

Электромеханическое преобразование осуществляется из предположения пропорциональности электромагнитного момента току в цепи. При наличии тока в цепи управления ЭМП на струйную трубку действует электромагнитный момент, при смещении струйной трубки происходит компенсация момента механической пружиной. Уравнение движения ЭМП связывает динамику электрической цепи с перемещением струйной трубки

$$J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = K_{mi} \cdot i(t) + K_{ma} \cdot \alpha(t) + b_v \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}, \quad (3)$$

где  $J$  – общий момент инерции струйной трубки с подвижной частью ЭМП, кг·м<sup>2</sup>;  $K_{mi}$  – постоянная момента, Н·м/А;  $K_{ma}$  – коэффициент, характеризующий жесткость механической пружины;  $b_0$  – коэффициент вязкого трения.

Параметры инерции определяются геометрией струйной трубки и материалами, используемыми при ее изготовлении. Жесткость механической пружины зачастую подбирают таким образом, чтобы обеспечить пропорциональное смещение струйной трубки по току без насыщения и перегрузки. Значение коэффициента вязкого трения определить достаточно сложно, т.к. он зависит от большого количества факторов, в первом приближении достаточно задать его приблизительно.

Уравнение баланса расхода определяет расход жидкости, входящей в гидроцилиндр, а также учитывает ее сжимаемость и сложный характер распределения расхода турбулентной затопленной струи

$$A_p \frac{dy(t)}{dt} + \left[ \frac{W_0 + A_p \cdot y(t)}{E} \right] \frac{dP_m(t)}{dt} = \frac{1}{2} Q_T \mu_Q \times \\ \times \left[ (1 + \underline{z}) \cdot \sqrt{\frac{P_T - P_m(t)}{\xi_p \cdot P_T}} - (1 - \underline{z}) \right] \times \\ \times \sqrt{\frac{P_T + P_m(t)}{\xi_p \cdot P_T}}, \quad (4)$$

где  $A_p$  – эффективная площадь гидроцилиндра, м<sup>2</sup>;  $W_0$  – характерный объем жидкости, м<sup>3</sup>;  $E$  – модуль упругости жидкости, Па;  $P_m(t)$  – перепад давления в гидроцилиндра, Па;  $Q_T$  – теоретический расход рабочей жидкости, м<sup>3</sup>;  $\mu_Q$  – коэффициент расхода;  $\underline{z}$  – относительное смещение струйной трубки,  $\underline{z} = \alpha / \alpha_{\max}$ ;  $P_T$  – перепад давления на гидроусилителе, Па;  $\xi_p$  – коэффициент восстановления расхода.

Модуль упругости жидкости зависит от температуры и давления, при математическом моделировании принимают его среднее значение в данном диапазоне температур и давлений. Для определения коэффициента восстановления давления используют эмпирические соотношения [6]. Коэффициент расхода может изменяться в широком диапазоне, что связано с изменением характеристик рабочей жидкости и допусками при проектировании привода.

Динамика движения нагруженного гидроцилиндра описывается классической моделью нагрузки, учитывающей нежесткость крепления гидроцилиндра, а также позиционный и инерционный характер нагружения

$$M \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = A_p \cdot P_m(t) - R - C_y \times \\ \times y(t) - b_y \frac{dy(t)}{dt}, \quad (5)$$

где  $M$  – масса нагрузки, кг;  $R$  – постоянное усилие на штоке гидроцилиндра, Н;  $C_y$  – коэффициент жесткости позиционной нагрузки, Н/м;  $b_y$  – коэффициент вязкого трения гидроцилиндра.

В настоящее время моделирование характеристик электрогидравлического привода затруднено, что связано с недостаточностью детерминации таких параметров как коэффициент вязкого трения гидроцилиндра, коэффициент жесткости позиционной нагрузки гидроцилиндра и коэффициент расхода. Это объясняется тем, что в процессе эксплуатации привода характеристики рабочей жидкости могут изменяться в широких пределах, а также сложностью определения параметров жесткости.

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Идентификация параметров ЭГП включает в себя следующие этапы:

- 1) разработка математической модели идентифицируемой системы;
- 2) определение параметров модели (за исключением идентифицируемого параметра);
- 3) определение основных показателей в зависимости от метода идентификации: для метода градиентного спуска определяются начальное приближение и размер шага, для метода равномерного поиска определяется сетка значений исследуемого параметра;
- 4) итерационный поиск минимума (максимума) критерия идентификации по результатам численного решения и экспериментальных данных.

В качестве объекта для получения экспериментальных данных использовался стенд для испытания электрогидравлической системы гидропривода. Эксперименты проводились при подаче единичного «скачка» управляющего сигнала. Обработанный сигнал перемещения штока гидроцилиндра является базовой выборкой экспериментальных данных, под которые производилась идентификация.

Критерием идентификации является квадрат ошибки экспериментальных данных с результатами численного моделирования – значение параметра должно обеспечивать минимальный квадрат ошибки

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2, \quad (6)$$

где  $RSS$  – сумма квадратов ошибки;  $y_i$  – результат наблюдения;  $f(x_i)$  – результат вычисления.

Численное решение системы дифференциальных уравнений, входящих в математическую модель гидропривода, осуществлялось с помощью метода Рунге – Кутты – Фельберга с контролем точности.

При идентификации параметров ЭГП применялись методы градиентного спуска и равномерного поиска.

Метод градиентного спуска заключается в задании изменения идентифицируемого параметра до достижения им нулевого градиента минимизируемой функции, при его использовании необходимо указать начальное приближение идентифицируемого параметра.

На рис. 1 приведен алгоритм применения метода градиентного спуска при идентификации параметров ЭГП.



Рис. 1. Алгоритм идентификации методом градиентного спуска

При идентификации методом градиентного спуска перед каждым численным решением системы дифференциальных уравнений задается значение идентифицируемого параметра, для первой итерации берется начальное приближение, в последующих расчетах параметр вычисляется по следующей формуле

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \nabla f(x_k), \quad (7)$$

где  $x_{k+1}$  – значение параметра на следующем шаге итерации;  $x_k$  – текущее значение параметра;  $\nabla f(x_k)$  – градиент исследуемой функции на текущем шаге, для численного решения можно принять  $\nabla f(x_k) = f(x_{k-1}) - f(x_k)$ ;  $\alpha_k$  – размер шага, определяющий скорость алгоритма перебора значений.

Под исследуемой функцией предполагается зависимость суммы квадратов ошибки численного решения к значениям идентифицируемого параметра.

С помощью метода градиентного спуска идентифицируемый параметр – коэффициент расхода – был определен за 15 итераций.

Данный подход позволяет найти локальный минимум функции при перемещении вдоль градиента, при этом не требуется определение сетки расчетных параметров. Локальный минимум функции не всегда является глобальным или удовлетворяющим ограничениям реального объекта (найденный параметр может принять отрицательные или бесконечные значения).

Метод равномерного поиска позволяет найти наиболее подходящие значения из сетки заранее заданных параметров, и является наиболее простым методом нахождения минимума, при этом объем вычислений прямо пропорционален количеству заданных параметров.

На рис. 2 приведен алгоритм использования метода равномерного поиска при идентификации параметров электрогидравлического привода.



Рис. 2. Алгоритм идентификации методом равномерного поиска

В отличие от метода градиентного спуска в методе равномерного поиска при наличии локального минимума итерационный процесс не останавливается. Точность метода равномерного поиска определяется шагом расчетной сетки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты идентификации коэффициента расхода жидкости ЭГП представлены на рис. 3.

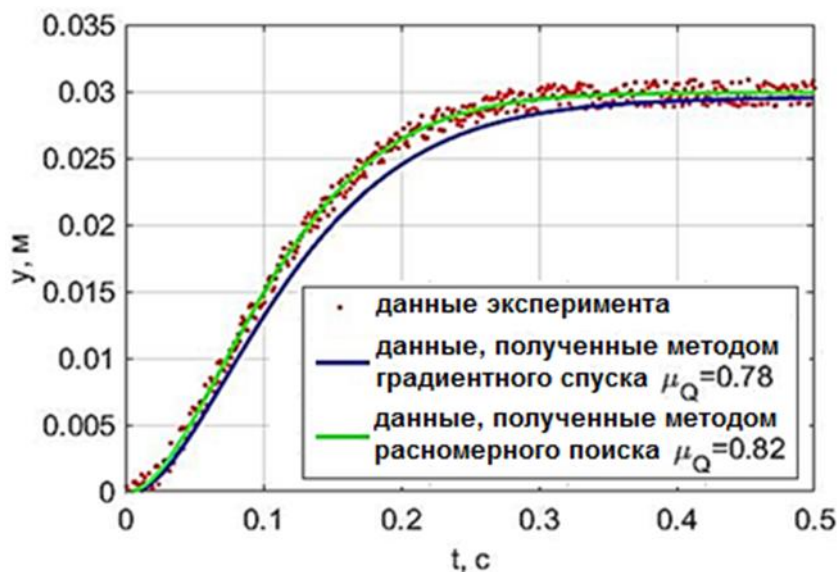


Рис. 3. Результаты идентификации коэффициента расхода жидкости ЭГП

Идентификация методом градиентного спуска не обеспечивает точного воспроизведения экспериментальных данных, что связано с обнаружением локального минимума по функционалу квадрата ошибки.

Использование аналогичных методов поиска (инерционные методы, метод Ньютона) при нахождении глобального минимума и достоверной идентификации параметра – коэффициента расхода жидкости ЭГП – является нецелесообразным в рамках предложенной нелинейной модели электрогидравлического привода.

Стоит отметить, что при оценке неизвестных параметров ЭГП для быстрого достижения условия остановки итераций эффективнее использовать метод градиентного спуска.

При использовании метода равномерного поиска экспериментальные данные воспроизводятся с высоким значением коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,99$ ). Расчетная сетка при применении данного метода включает 100 значений идентифицируемого параметра. Высокое значение коэффициента детерминации свидетельствует об адекватности предложенной нелинейной модели электрогидравлического привода систем управления летательными аппаратами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе реализована идентификация коэффициента расхода жидкости электрогидравлического привода с использованием численного решения нелинейной математической модели и алгоритмов поиска минимума функции квадрата ошибки.

Полученные результаты с высокой точностью совпали с результатами экспериментов при идентификации методом равномерного поиска. Данный метод является универсальным при нахождении глобального минимума, но требует ресурсов для вычисления и точного задания сетки (шага) вычисления.

Поскольку исходные данные были определены с достаточно высокой погрешностью, метод градиентного спуска остановил процесс поиска при первом приближении численного решения к экспериментальным данным (нахождение локального минимума функции квадрата ошибки). Таким образом, метод градиентного спуска обладает высоким быстродействием и эффективен при идентификации с большим спектром командного сигнала и последующей фильтрацией высоких частот.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месропян А. В., Целищев В. А. Моделирование струйных гидравлических рулевых машин: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 211 с. [A. V. Mesropyan, V. A. Tselishchev, *Modeling of jet hydraulic steering machines: training manual*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2008.]

2. Месропян А. В., Шарипов Р. Р. Моделирование реальных нагрузок на стенде испытания гидроприводов // Молодежный вестник УГАТУ. 2018. № 1 (18). С. 73–75. [ A. V. Mesropyan, R. R. Sharipov, "Simulation of real loads on the hydraulic drive test bench", (in Russian), in *Molozhny Vestnik UGATU*, no. 1 (18), pp. 73-75, 2018. ]

3. Галлямов Ш. Р. Улучшение динамических характеристик рулевого привода летательного аппарата на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.13. Уфа: УГАТУ, 2009. 198 с. [ Sh. R. Gallyamov, *Improving the dynamic characteristics of the steering drive of an aircraft based on simulation modeling*: Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: UGATU, 2009. ]

4. Ling T. G., Rahmat M. F., Husain A. R. System identification of electro-hydraulic actuator system using ANFIS approach // J. Teknol. (Sciences Eng.). 2014. Vol. 67, No. 5. Pp. 41-47. [ T. G. Ling, M. F. Rahmat, A. R. Husain, "System identification of electro-hydraulic actuator system using ANFIS approach", in *J. Teknol. (Sciences Eng.)*, vol. 67, no. 5, pp. 41-47, 2014. ]

5. Корнюшин Ю. П., Егупов Н. Д., Корнюшин П. Ю. Идентификация нелинейных объектов и систем управления с использованием аппарата матричных операторов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 6 (30). С. 1–14. [ Yu. P. Kornuyushin, N. D. Egupov, P. Yu. Kornuyushin, "Identification of nonlinear objects and control systems using the apparatus of matrix operators", (in Russian), in *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii*, no. 6 (30), pp. 1-14, 2014. ]

6. Струйные гидравлические рулевые машины: монография / Ю. К. Кириллов [и др.]. Уфа: РНТИК «Баштехинформ» АН РБ, 2002. 284 с. [ Yu. K. Kirillov, et al., *Jet hydraulic steering gears: monograph*, (in Russian). Ufa: RNTIK "Bashtehinform" AN RB, 2002. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**МИТЯГИНА Мария Олеговна**, доц. каф. теоретич. мех. М-р техн. в обл. гидравлич., вакуумной и компрессорной техники (УГАТУ, 2012). Канд. техн. наук по гидравлич. машинам и гидропневмоагрегатам (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. разработки и проектирования электрогидравлической аппаратуры.

**ШАРИПОВ Руслан Рамилевич**, асп. каф. ПГМ. Дипл. инженера (УГАТУ, 2015). Готовит дис. о гидравлических следящих приводах.

#### METADATA

**Title:** The question of parametric identification of a nonlinear model of an electrohydraulic drive of aircraft control systems.

**Authors:** M. O. Mityagina<sup>1</sup>, R. R. Sharipov<sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>teor\_mech@mail.ru, <sup>2</sup>obter@ya.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 69-75, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper proposes an approach to the identification of the parameters of the electro-hydraulic drive of the aircraft control systems. A mathematical model of an electro-hydraulic drive is described, which includes a model of an electromechanical converter, a model of a hydraulic amplifier and a model of an executive hydraulic motor with a payload. The method of gradient descent and the method of uniform search are considered as identification methods. The results of identification of the coefficient of consumption of the electrohydraulic drive are given.

**Key words:** electro-hydraulic drive; mathematical model; identification; gradient descent method; hydraulic drive tests.

#### About authors:

**MITYAGINA, Maria Olegovna**, Assoc. Prof. Dept. of theoretical mechanic. Master of technics (USATU, 2012). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2013).

**SHARIPOV, Ruslan Ramilevich**, postgrad. (PhD) student. Dept. of Applied hydromechanics. Dipl. engineer (USATU, 2015).