

# **Идентификация математической модели главного золотника для системы диагностики и адаптивного управления открытием направляющего аппарата**

**С.А. Браганец, А.С. Гольцов, А.В. Савчиц**

На данный момент в гидроэнергетике широкое распространение получили гидроагрегаты с поворотно-лопастной турбиной. Главным регулирующим органом системы управления активной мощностью и частотой является система открытия направляющего аппарата [1]. Основными узлами системы открытия направляющего аппарата являются главный золотник и сервомотор. От качества и надежности работы данных узлов зависит качество работы гидроагрегата в целом.

Для повышения качества и надежности работы системы открытия направляющего аппарата была предложена адаптивная система управления и диагностики системы открытия направляющего аппарата [2]. Как известно, адаптивные системы управления являются эффективным инструментом повышения качества управления при изменяющихся условиях и наличии разного рода неопределенностей [3,4].

Важным этапом синтеза адаптивной системы управления является синтез математических моделей системы управления и алгоритма их идентификации в режиме реального времени [5].

Упрощенная схема главного золотника представлена на рис. 1. Золотник относится к классу регулируемых дросселирующих распределителей [6].

В качестве математической модели главного золотника были предложены нелинейная математическая модель и линейная модель с переменными параметрами. При достаточной скорости сходимости алгоритмов идентификации линейные модели с переменными параметрами эквивалентны моделям, линеаризованным вблизи опорной траектории [7].

Математическое моделирование показало, что линейная модель с переменными параметрами дает результаты по точности сравнимые с нелинейной моделью, поэтому для использования в контуре идентификации адаптивной системы управления была выбрана линейная математическая модель идентификации.

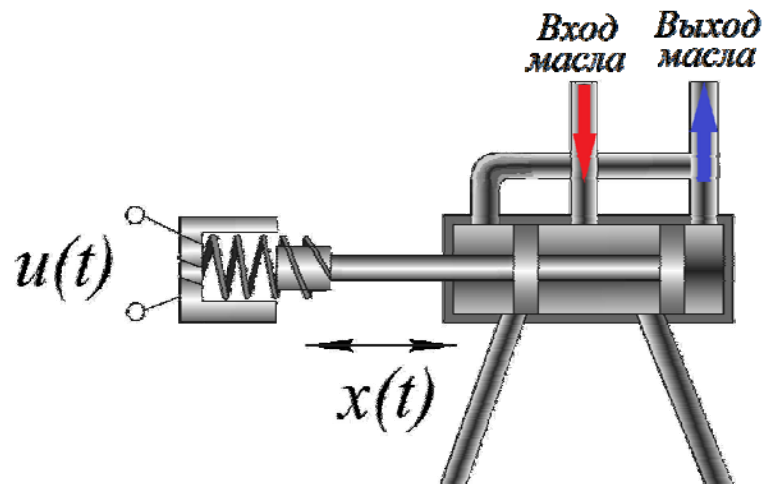


Рис. 1 – Упрощенная схема главного золотника системы открытия направляющего аппарата

В результате анализа сил, действующих на главный золотник, была получена следующая дискретная математическая модель главного золотника в пространстве состояний:

$$\begin{cases} z_{1,k} = -r_{1,k-1} \cdot z_{1,k-1} - r_{2,k-1} \cdot z_{2,k-1} - r_{3,k-1} \cdot u_{k-1} + w_k \\ z_{2,k} = z_{1,k-1} \\ x_k = z_{1,k} + v_k \end{cases}$$

где  $z_k = (z_{1,k} \ z_{2,k})^T = (x_k \ x_{k-1})^T$  – вектор переменных состояния главного золотника,  $x_k$  – положение штока главного золотника в  $k$ -й момент времени,  $r_k$  – вектор параметров математической модели главного золотника в  $k$ -й момент времени, подлежащие идентификации,  $w_k$  – неизвестное возмущающее воздействие,  $v_k$  – погрешность измерения.

Для идентификации переменных параметров математической модели главного золотника был составлен расширенный вектор переменных

состояния и математическая модель главного золотника в расширенном пространстве состояния:

$$\begin{cases} L_k = A_{k-1}L_{k-1} + Gw_k \\ x_k = HL_k + v_k \end{cases}$$

где  $L_k = (z_{1,k} \quad z_{2,k} \quad r_{1,k} \quad r_{2,k} \quad r_{3,k})^T$  - расширенный вектор переменных состояния,  $A_k, H, G$  - матрицы коэффициентов:

$$A_k = \begin{pmatrix} -L_{3,k} & -L_{4,k} & -L_{1,k} & -L_{2,k} & u_k \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$G^T = H = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0).$$

Таким образом, идентификация даже линейной системы приводит к нелинейным уравнениям состояния.

Идентификация системы подразумевает оценивание параметров этой системы оптимальное в смысле некоторого критерия идентификации или обучения. Таким образом, задача идентификации сводится к задаче оптимальной нелинейной фильтрации [8]. Также идентификацию можно трактовать как оптимальное управление объектом, описанным в расширенном пространстве состояний.

В зависимости от выбора критерия обучения могут получаться разные алгоритмы для идентификации одной и той же системы. Выбор критерия обучения является чаще всего интуитивным, эвристическим и зависит от предпочтений исследователя, так как нет единых правил для выбора «правильного» критерия [9]. Существуют различные критерии обучения, самыми распространенными из которых являются квадратичные, модульные и ступенчатые.

В качестве критерия обучения был принят квадратичный критерий:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot (x_0 - \hat{x}_0)^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_0^{k_f} \{ \gamma_1 \cdot (x_k - \hat{x}_k)^2 + \gamma_2 \cdot (w_k)^2 \} \quad (1)$$

где  $\beta, \gamma_1, \gamma_2$  - весовые коэффициенты,  $\hat{x}_k = H\hat{L}_k$  - оценка положения штока золотника по модели,  $k_f$  - конечный момент времени оптимизационного процесса.

Данный критерий совпадает с дискретным критерием максимума апостериорной вероятности (МАН) при  $\beta = V_0^{-1}$  - дисперсия погрешности задания начальных условий,  $\gamma_1 = V_w^{-1}$  и  $\gamma_2 = V_v^{-1}$  - дисперсии шумов процесса и шумов измерения, при этом шумы процесса считаются независимыми марковскими последовательностями гауссовских случайных величин с нулевым средним [10]. В таком случае данный метод дает наилучшие оценки в смысле байесовского максимума правдоподобия. Выполнение таких строгих условий в реальном процессе является практически невозможным. При невыполнении этих условий решение данной оптимизационной задачи с критерием гарантирует получение оценки оптимальной по методу наименьших квадратов [7,10].

Таким образом, задача идентификации математической модели главного золотника сводится к минимизации выбранного критерия обучения (1) с ограничениями, задаваемыми математической моделью главного золотника.

Задачу можно решить с помощью дискретного принципа максимума Понтрягина или дискретных уравнений Эйлера-Лагранжа [10]. Гамильтониан для данной оптимизационной задачи:

$$H(x_k, w_k, \lambda_k) = \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot (x_k - H\hat{L}_k)^2 + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot (w_k)^2 + \lambda_k^T A_{k-1} \hat{L}_{k-1} + \lambda_k^T G w_k$$

где  $\lambda_k$  - вектор неопределенных множителей Лагранжа.

Канонические уравнения:

$$\hat{L}_k = \frac{\partial H}{\partial \lambda_k} \quad (2)$$

$$\lambda_k = \frac{\partial H}{\partial \widehat{L}_k} \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial w_k} = 0 \quad (4)$$

Граничные условия для канонических уравнений:

$$\lambda_0 = \beta \cdot (x_0 - H\widehat{L}_0) \quad (5)$$

$$\lambda_{k_f} = 0 \quad (6)$$

Каноническими уравнениями (2) – (4) и соответствующими граничными условиями (5), (6) определяется нелинейная двухточечная краевая задача (ДТКЗ), решением которой является искомый алгоритм оценки параметров системы [10].

Решение нелинейной ДТКЗ аналитически представляет собой чаще всего неразрешимую или очень сложную задачу, поэтому чаще всего ДТКЗ решаются численными методами.

Одним из возможных и эффективных методов решения ДТКЗ является метод инвариантного погружения. Основная идея метода инвариантного погружения состоит во включении частной задачи в более общую. Если можно решить общую задачу, то частная решается автоматически. Инвариантное погружение преобразует двухточечную краевую задачу к задаче Коши с заданными начальными условиями.

Метод инвариантного погружения является одним из самых мощных математических методов идентификации, позволяет оценивать состояние и параметры как линейных, так и нелинейных систем, а также позволяет проводить оценивание в контуре обратной связи реальных систем управления в оперативном текущем времени, т.е. пригоден для использования в адаптивных системах управления [11].

В данном случае осуществляется инвариантное погружение ДТКЗ (2) – (6), допустив, что условие на конце траектории при  $k = k_f$  равно не нулю, а

некоторому числу  $\lambda_{k_f} = c$ . Кроме того, обобщается то, что величина  $c$  и момент времени  $k_f$  переменны [7].

В результате решения ДТКЗ (2) – (6) методом инвариантного погружения получается следующий алгоритм идентификации:

$$\begin{cases} \hat{L}_k = A_{k-1} \hat{L}_{k-1} + P_k H^T \gamma_1 (x_k - H \hat{L}_{k-1}) \\ P_k^a = G \gamma_2 G^T + A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T \\ P_k = P_k^a - P_k^a H^T (H P_k^a H^T + \gamma_1)^{-1} H P_k^a \end{cases}$$

с начальными условиями

$$L_0 = (L_{1,0} \quad L_{2,0} \quad r_{1,0} \quad r_{2,0} \quad r_{3,0})^T$$

$$P_0 = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_5^2 \end{pmatrix}$$

где  $P_k$  - дисперсия оценивания переменных состояния,  $\sigma_n^2$  - дисперсия ошибки задания начальных условий для  $n$ -ой переменной состояния,  $P_k^a$  - вспомогательная матрица (априорная дисперсия оценивания).

Начальные оценки вектора параметров математической модели  $r_0$  получены одношаговым методом наименьших квадратов.

Для проверки адекватности математической модели было проведено компьютерное моделирование работы главного золотника системы открытия направляющего аппарата. Для моделирования использовались реальные значения управляющего сигнала и перемещения главного золотника, измеренные и записанные штатной системой управления во время пуска гидроагрегата № 2 Волжской ГЭС.

На рис. 2 представлен результат компьютерного моделирования процесса перемещения главного золотника системы открытия направляющего аппарата по линейной модели.

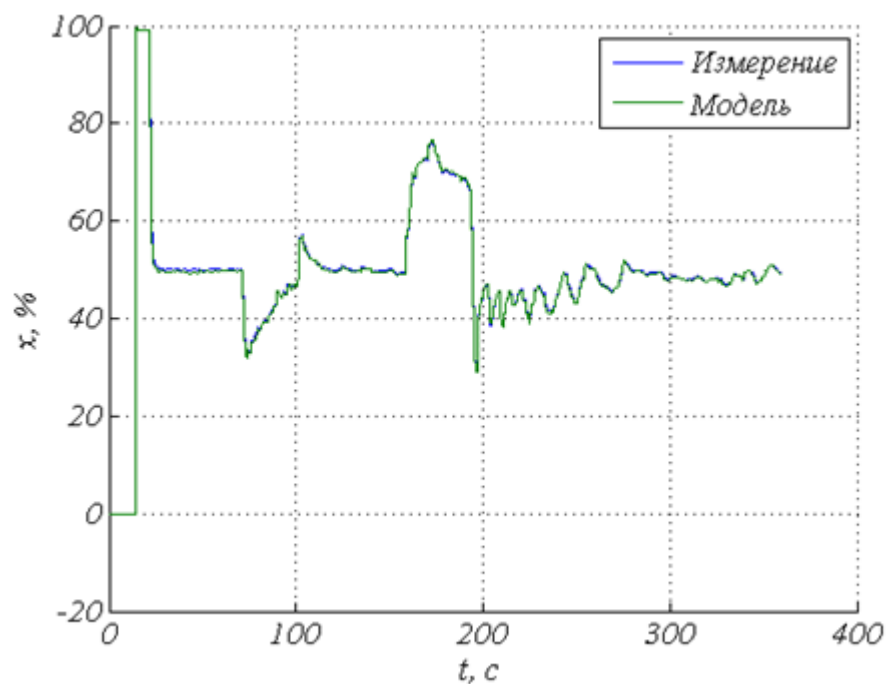


Рис. 2 – Моделирование перемещения главного золотника

На рис. 3 представлен сигнал невязки линейной модели и измеренных данных (ошибка моделирования).

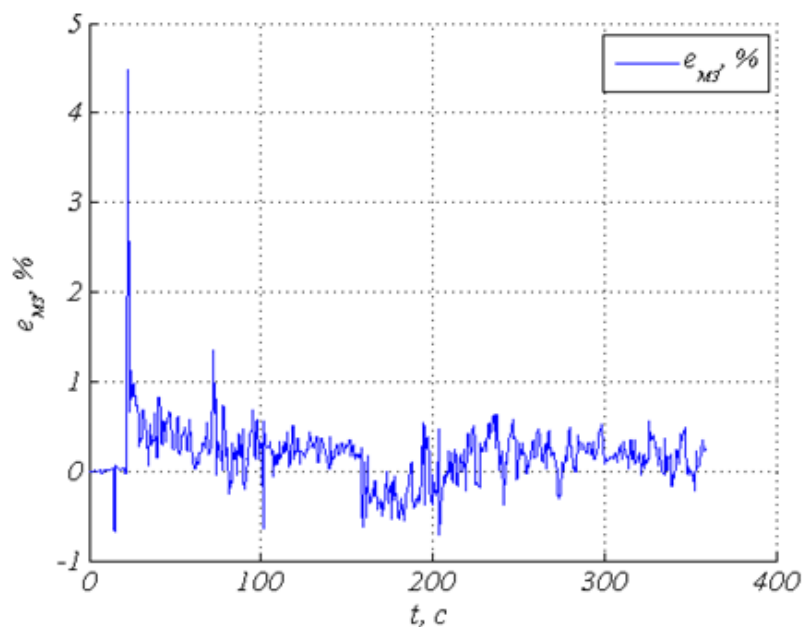


Рис. 3 – Сигнал невязки модели и измеренных данных

Среднее значение сигнала невязки  $\bar{e} = 0.18\%$ , стандартное отклонение  $s = 0.36\%$ . Ошибка моделирования достигает максимального по модулю

значения  $\max|e| = 4.47\%$  в начальный момент времени во время пуска. Это связано с тем, что в начальный момент времени коэффициенты математической модели еще не подстроились. С течением времени невязка уменьшается.

Таким образом, получена линейная математическая модель главного золотника с переменными параметрами и алгоритм непрерывной идентификации параметров модели золотника. Результаты компьютерного моделирования с использованием реальных данных подтвердили адекватность линейной математической модели с переменными параметрами и эффективность алгоритма идентификации. Данная линейная математическая модель совместно с алгоритмом идентификации была использована для синтеза адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата.

### Литература

1. Kjolle, A. Hydropower in Norway. Mechanical equipment / A. Kjolle. – Trondheim: NUST, 2001. – p. 183
2. Браганец С.А., Гольцов А.С., Савчиц А.В. Система адаптивного управления и диагностики сервомоторов направляющего аппарата гидроагрегата с поворотно-лопастной турбиной [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1807> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. Н.А. Целигоров, Е.Н. Целигорова, Г.М. Мафура Математические модели неопределённостей систем управления и методы, используемые для их исследования [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Н.А. Целигоров, Г.М. Мафура Причины возникновения интервальных значений в математических моделях исследования робастной устойчивости



систем управления [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1277> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

5. Astrom K.J. Advanced PID control. –ISA. Triangle Park, 2006. – p. 446

6. Схиртладзе, А.Г. В.Н. Гидравлические и пневматические системы [Текст]: Учебник для ВУЗов / А.Г. Схиртладзе, В.И. Иванов, В.Н. Кареев – М.: Высшая школа, 2006. – 534 с.

7. Гольцов, А.С. Адаптивные системы: автоматическое управление нелинейными объектами: Монография / А.С. Гольцов. – Орел: Академия ФАПСИ, 2002. – 155 с.

8. Красовский, А.А. Справочник по теории автоматического управления / А. А. Красовский. – М.: Наука, 1987. –712 с.

9. Цыпкин, Я. З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин – М.: Наука, 1991. – 336 с.

10. Сейдж, Э.П. Идентификация систем управления / Э.П. Сейдж, Д.П. Мелса – М.: Наука, 1974. – 248 с.

11. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп – М.: Мир, 1979. – 302 с.