

С. В. АРАНОВСКИЙ, Л. Б. ФРЕЙДОВИЧ, Л. В. НИКИФОРОВА, А. А. ЛОСЕНКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИКИ ЗОЛОТНИКОВОГО ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТЬ II. ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

Предложен метод идентификации параметров модели, использующий датчики давления и не требующий измерения положения штока золотника. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: золотник, гидравлическая система, математическая модель, идентификация.

В настоящей работе, в продолжение статьи [1], рассматривается задача моделирования и идентификации одного из ключевых элементов гидропривода — золотникового гидрораспределителя.

Идентификация параметров. В работе [1] была предложена модель гидрораспределителя (1)—(5). При разработке метода идентификации параметров авторы исходили из следующего: согласно модели (3)—(5) [1], при открытии золотника (когда значение x_{ef} становится отличным от нуля) изменение в положении штока X произойдет, когда гидравлическая сила F_{hydr} превысит по абсолютной величине статическое трение. При этом изменение в давлении начинается сразу же, задержкой распространения давления в жидкости в шлангах между гидрораспределителем и гидроцилиндром можно пренебречь.

Рассмотрим следующий эксперимент. На вход системы подается постоянный управляющий сигнал (постоянный ток). По измерениям давления определяется задержка между подачей постоянного входного сигнала и началом изменения давления. По измерениям положения штока гидроцилиндра определяется установившаяся скорость движения. Эксперимент повторяется несколько раз, входной ток варьируется от минимального до максимального с некоторым шагом. В результате экспериментов фиксируются следующие величины: $i_{dz}^{neg}, i_{dz}^{pos}$ — отрицательное и положительное граничные значения тока, при которых начинается изменение давления; $i_{sat}^{neg}, i_{sat}^{pos}$ — отрицательное и положительное граничные значения тока, при превышении которых установившееся значение скорости не меняется (при отсутствии датчика положения штока гидроцилиндра для оценки величин $i_{sat}^{neg}, i_{sat}^{pos}$ может использоваться установившееся значение давления, так как при наличии вязкого трения оно будет увеличиваться вместе с ростом скорости); $i_i^{ref}, t_i^{del}, i = 1, \dots, N$ — набор значений тока и задержки для тех N экспериментов, в которых ток превышал границы $i_{dz}^{neg}, i_{dz}^{pos}$. С учетом единичного коэффициента k_s для нормализованных величин справедливы следующие соотношения:

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0778 „Разработка методов построения и настройки систем управления, а также функциональной автоматизации многозвенных гидравлических кранов на подвижных платформах (ГКПП) для лесозаготовительной промышленности“.

$$\left. \begin{aligned} i_{dz}^{\text{neg}} &= x_s^{\text{left}} / k_s = x_s^{\text{left}}, \\ i_{dz}^{\text{pos}} &= x_s^{\text{right}} / k_s = x_s^{\text{right}}, \\ i_{\text{sat}}^{\text{neg}} &= x_s^{\text{min}} / k_s = x_s^{\text{min}}, \\ i_{\text{sat}}^{\text{pos}} &= x_s^{\text{max}} / k_s = x_s^{\text{max}}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решение системы (1)—(2) [1] при постоянном входном сигнале $i(t) = i_0$ для интервала времени $x_s^{\text{min}} \leq x_s \leq x_s^{\text{max}}$ имеет вид

$$x_s(t) = k_s i_0 (1 - \exp(-\lambda t)) + x_s(0) \exp(-\lambda t), \quad (2)$$

где $\lambda = 1/\tau$. Так как во всех экспериментах в начальный момент времени гидрораспределитель был закрыт и шток золотника находился в нейтральном положении, то можно принять $x_s(0) = 0$. Тогда задержку между подачей входного сигнала и достижением границы мертвой зоны штоком золотника можно найти как:

$$\left. \begin{aligned} i_i^{\text{ref}} (1 - \exp(-\lambda t_i^{\text{del}})) &= i_{dz}^{\text{pos}}, \quad i_i^{\text{ref}} > 0, \\ i_i^{\text{ref}} (1 - \exp(-\lambda t_i^{\text{del}})) &= i_{dz}^{\text{neg}}, \quad i_i^{\text{ref}} < 0, \\ i &= 1, \dots, N, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

или

$$\left. \begin{aligned} -\lambda t_i^{\text{del}} &= \ln \left(1 - \frac{i_{dz}^{\text{pos}}}{i_i^{\text{ref}}} \right), \quad i_i^{\text{ref}} > 0, \\ -\lambda t_i^{\text{del}} &= \ln \left(1 - \frac{i_{dz}^{\text{neg}}}{i_i^{\text{ref}}} \right), \quad i_i^{\text{ref}} < 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Система (4) образует линейную регрессию и оценка $\hat{\lambda}$ может быть получена методом наименьших квадратов

$$\hat{\lambda} = (T^T T)^{-1} T^T L, \quad (5)$$

где $(N \times 1)$ -матрицы T и L задаются как

$$\begin{aligned} T_i &= t_i^{\text{del}}, \\ L_i &= \begin{cases} \ln \left(1 - \frac{i_{dz}^{\text{pos}}}{i_i^{\text{ref}}} \right), & i_i^{\text{ref}} > 0, \\ \ln \left(1 - \frac{i_{dz}^{\text{neg}}}{i_i^{\text{ref}}} \right), & i_i^{\text{ref}} < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, выражения (1), (5) и (6) позволяют определить параметры модели (1)—(2) [1].

Более сложная модель гидрораспределителя может быть построена на базе модели (1) [1] и идентифицирована с использованием процедуры оптимизации. Рассмотрим модель гидрораспределителя с линейной подсистемой второго порядка с единичным коэффициентом усиления. Тогда уравнение (1) [1] может быть представлено следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 \dot{x}_1 &= Proj_{x_1}(x_2), \\ \tau_2 \dot{x}_2 &= k_s i - x_1 - x_2, \\ x_{\text{ef}}(t) &= f_{dz}(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Отметим, что подстановка $\tau_2 = 0$ сводит модель (7) к (1) [1] с $\tau = \tau_1$. Система (7) содержит шесть неизвестных параметров $[\tau_1 \ \tau_2 \ x_s^{\max} \ x_s^{\min} \ x_s^{\text{left}} \ x_s^{\text{right}}]$. Параметры $x_s^{\text{left}}, x_s^{\text{right}}, x_s^{\min}, x_s^{\max}$ находятся согласно (1). Решение системы (7) зависит от вида корней характеристического уравнения, и задача идентификации не может быть сведена к линейной форме, подобной (4). Обозначим оценки неизвестных параметров как $\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2$. Тогда система (7) может быть численно решена, и оценка задержки t_i^{del} между подачей входного сигнала i_i^{ref} и достижением границы мертвой зоны штоком золотника является функцией оценок неизвестных параметров

$$\hat{t}_i^{\text{del}} = \hat{t}_i^{\text{del}}(\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2). \tag{8}$$

Представим критерий правдоподобия как сумму квадратов отклонений между задержками t_i^{del} , полученными в ходе эксперимента, и их оценками, полученными численным моделированием системы (7)

$$J(\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2) = \sum_{i=1}^N (t_i^{\text{del}} - \hat{t}_i^{\text{del}})^2. \tag{9}$$

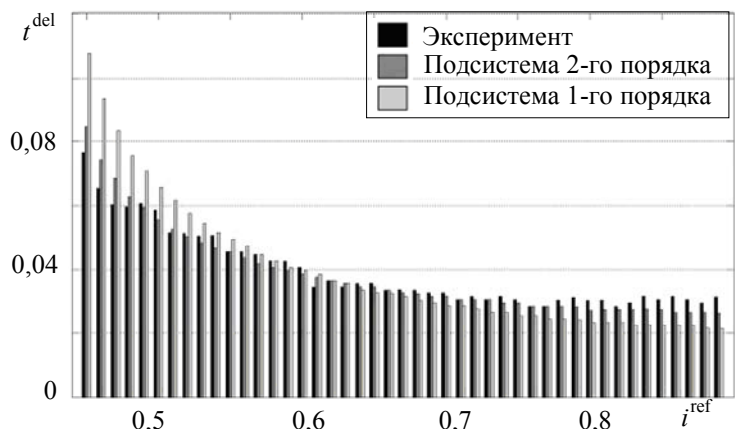
Тогда задача идентификации вектора неизвестных параметров $\hat{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2]$ может быть сформулирована как задача оптимизации

$$\hat{\tau} = \arg \min_{\tau} J(\hat{\tau}), \tag{10}$$

которая может быть решена с привлечением численных методов. Таким образом, выражения (1), (10) позволяют определить параметры модели (7).

Экспериментальные исследования проводились для гидропривода телескопического звена крана-манипулятора, используемого в лесотехнической промышленности [2]. Согласно описанной выше методике, были проведены эксперименты по подаче постоянного входного сигнала. В результате экспериментов получено 45 значений пар $i_i^{\text{ref}}, t_i^{\text{del}}$: 15 случайно выбранных значений использовались для идентификации, а оставшиеся 30 — для верификации. Идентификация проводилась для двух моделей гидропривода — модели с линейной подсистемой первого порядка (1)—(2) [1] и с линейной подсистемой второго порядка (7). Задача (10) была решена с использованием симплекс-метода Нелдера—Мида.

На рисунке представлена диаграмма, иллюстрирующая результаты идентификации. По оси абсцисс отложены значения входного сигнала i_i^{ref} , а по оси ординат — полученная экспериментально задержка t_i^{del} и ее оценки при использовании моделей с линейной подсистемой первого и второго порядков. Из диаграммы видно, что предложенные модели позволяют описать и спрогнозировать наблюдаемые экспериментально задержки, чего нельзя достичь с использованием идеальной пропорциональной модели [3, 4]. Из результатов эксперимента видно, что модель с подсистемой второго порядка позволяет более точно аппроксимировать результаты эксперимента, чем модель с подсистемой первого порядка. При этом проведенные исследования показали, что при дальнейшем увеличении порядка модели точность аппроксимации увеличивается незначительно.



Заключение. При анализе переходных процессов в гидравлических системах можно выявить задержку между подачей входного сигнала и началом переходных процессов давлений в полостях гидропривода, причем величина задержки меняется при изменении амплитуды входного сигнала. Данная задержка не описывается пропорциональными моделями гидрораспределителя, однако может быть аппроксимирована моделью с нелинейностью типа „мертвая зона“. В работе предложена соответствующая модель, состоящая из линейной подсистемы и нелинейностей типа „насыщение“ и „мертвая зона“.

Предложен метод идентификации, который, в отличие от большинства аналогов, не требует прямого измерения параметров золотника или установки датчика положения штока золотника; в нем используется только измерение давления в полостях гидроцилиндра. Для модели с подсистемой первого порядка предложенный метод позволяет свести задачу идентификации к задаче оценивания параметров линейной регрессии. Для подсистемы второго порядка задача идентификации сводится к задаче минимизации критерия, построенного на невязке модели.

Предложенная модель позволяет прогнозировать задержку в отклике гидропривода на входное воздействие, давая более точную оценку, чем идеальная (пропорциональная) модель, учитывающая только статическое трение. Предложенная модель может использоваться при прогнозировании максимально достижимого быстродействия гидропривода и манипулятора на его основе, при планировании оптимальных (по времени) траекторий движения, при построении законов управления, при моделировании замкнутых систем и оценке их робастности и т.д.

Приведенные результаты экспериментальных исследований иллюстрируют применимость предложенной модели и метода идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арановский С. В., Фрейдovich Л. Б., Никифорова Л. В., Лосенков А. А. Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя. Часть I. Моделирование // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 4. С. 52—56.
2. La Hera P. M., Mettin U., Westerberg S., Shiriaev A. S. Modeling and control of hydraulic rotary actuators used in forestry cranes // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. 2009. P. 1315—1320.
3. Gray J., Krstic M., Chaturvedi N. Parameter Identification for Electrohydraulic Valvetrain Systems // J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2011. N 6. P. 064 502.
4. Sohl G. A., Bobrow J. E. Experiments and simulations on the nonlinear control of a hydraulic servosystem // Control Systems Technology, IEEE Transactions. 1999. N 2. P. 238—247.

Сведения об авторах

- Станислав Владимирович Арановский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; старший научный сотрудник; E-mail: s.aranovskiy@gmail.com
- Леонид Борисович Фрейдovich** — канд. физ.-мат. наук; Университет Умео, департамент прикладной физики и электроники, Швеция; доцент; E-mail: leonid.freidovich@umu.se
- Лилия Вальтеровна Никифорова** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: liliya.nikiforova@gmail.com
- Андрей Андреевич Лосенков** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; лаборант; E-mail: alosenkov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 13.12.12 г.