УДК 669.046.658.52.011.56

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА БАЗЕ ЗАМКНУТЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Венгер К. Г., Линков А. А., Мышляев Л. П., Евтушенко В. Ф., Агеев Д. А.

NUMERICAL STUDIES OF IDENTIFICATION ALGORITHMS ON THE BASIS OF CLOSED DYNAMIC SYSTEMS

Venger K. G., Linkov A. A., Myshlyaev L. P., Evtushenko V. F., Ageev D. A.

Работа выполнена в рамках проекта № 2010-218-02-174 по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

В статье приводятся постановки задач и результаты численных исследований алгоритмов идентификации на базе замкнутых динамических систем для натурных объектов, модель которых представлена в виде последовательного соединения инерционного звена первого порядка с звеном чистого запаздывания. Исследования проведены как для детерминированных объектов, так и при наличии неопределенности, вызванной влиянием на объект идентификации неконтролируемых возмущений.

The article presents the problem formulation and numerical study of algorithms based on the identification of closed dynamical systems for natural objects whose model is represented as a series connection of inertial link with the first-order element of pure delay. Studies have shown how to determinate objects and the presence of uncertainty caused by the influence on object identification uncontrolled disturbances.

Ключевые слова: алгоритм идентификации, замкнутая динамическая система, математическое моделирование.

Keywords: identification algorithm, a closed dynamic system, mathematical modeling.

Предложенные в [1] новые процедуры синтеза алгоритмов идентификации, базирующиеся на представлении идентификаторов в виде замкнутых динамических систем (ЗДС), обладают тем явным преимуществом, что позволяют использовать хорошо развитые методы теории управления при синтезе идентификаторов для широкого класса объектов различной структуры. В таких идентификаторах объектом управления является модель натурного объекта заданной структуры, а параметрические управления (оцениваемые коэффициенты) вырабатываются регулятором из условия минимизации нормы от выходных воздействий модели и натурного объекта. Большинство же известных алгоритмов идентификации ориентировано на узкий класс структур объектов, в частности, алгоритм Качмажа [2] и его модификации – на линейно-параметрические объекты.

В [3] приведены постановки задач и результаты численных исследований алгоритмов идентификации на базе ЗДС для объектов с несколькими входными воздействиями, каналы преобразования которых можно представить в виде последовательного соединения пропорционального звена с звеном чистого запаздывания, имеющим различные значения для разных каналов преобразования изменений входных воздействий. По результатам этих исследований сделаны выводы о том, что с помощью алгоритмов на базе ЗДС для таких объектов получены оценки коэффициентов, равные их действительным значениям. В то время как оценки, полученные алгоритмом Качмажа для этих же условий, являются смещенными, причем значения этих оценок могут в несколько раз отличаться от действительных.

Исследования эффективности алгоритмов идентификации на базе ЗДС целесообразно также провести и для других структур объектов. Поэтому в настоящей статье приведены постановки задач и результаты численных исследований для объектов, модель которых представлена в виде последовательного соединения инерционного звена первого порядка с звеном чистого запаздывания. Исследования проводили как для детерминированных условий, когда на вход модельного объекта идентификации подавали, во-первых, скачкообразное входное воздействие, во-вторых, входное воздействие в виде псевдослучайной двоичной белой последовательности, в-третьих, когда такую последовательность подавали с дополнительным введением в модельный объект эффектов неконтролируемых возмущений.

Постановка первой задачи исследований представлена в следующем виде.

Дано. 1. Модельный объект идентификации

$$T\,\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t - \tau_u), \qquad (1)$$

где y и u – соответственно выходные и регулирующие воздействия объекта идентификации; k, T – коэффициент передачи и постоянная времени объекта, соответственно; τ_u – время запаздывания по каналу преобразования регулирующих воздействий; t – непрерывное время.

2. Диапазон изменений действительных значений коэффициентов модельного объекта идентифи-

кации (1) ограничен следующей областью, которая соответствует многим натурным объектам

$$0 \le k \le 1{,}0; \quad 0 \le T \le 1{,}0; \quad 0 \le \tau \le 1{,}0. \tag{2}$$

3. Математическая модель объекта идентификации представлена в дискретной линейно-параметрической форме [4]:

$$y^m(i) = \sum_{j=1}^{2} k_j^m(i-1) \cdot u_j(i-l_j), \tag{3}$$

где $y^m(i)$ – выходное воздействие модели объекта идентификации; $k_1^m(i)$; $k_2^m(i)$ – коэффициенты модели объекта (3); l_j – дискретное запаздывание по j-у каналу преобразования входных воздействий; i – дискретное время; j – номер учитываемого входного воздействия.

Модель (3) получена из (1) следующим образом:

3.1) осуществляли переход от дифференциального (1) к дифференциально-разностному уравнению:

$$y^m(i) = k_1^m y^m(i-1) + k_2^m u(i-l_u), \tag{4}$$

где l_u – дискретное запаздывание по каналу преобразования регулирующих воздействий, определяемое как

$$l_u = \frac{\tau_u}{\Delta t}; \tag{5}$$

$\Delta t = 0{,}01$ отн. ед. – шаг дискретизации времени, значения Δt выбирали в зависимости от динамических свойств модельного объекта идентификации, исходя из рекомендаций [5];

значения коэффициентов k_1 и k_2 рассчитывали по формулам [1]

$$k_1 = \frac{T}{T+\Delta t}; \quad k_2 = \frac{k\Delta t}{T+\Delta t}; \tag{6}$$

3.2) для перехода от модели (4) к модели линейно-параметрического вида (3) в соответствии с схемой Гаммерштейна [4] переопределяли входной сигнал:

$$u_1(i-l_1) = y(i-1); \qquad l_1 = 0; \tag{7}$$

$$u_2(i-l_2) = u(i-l_u); \qquad l_2 = l_u. \tag{8}$$

4. Алгоритм идентификации на базе ЗДС [1]:

$$k_j^m(i) = k_j^m(i-1) + \frac{u_j(i-l_j)}{\sum u_j^2(i-l_j)} \cdot \varepsilon_p(i); \tag{9}$$

$$\varepsilon_p(i) = y(i) - y^m(i); \tag{10}$$

$$y^m(i) = \sum_{j=1}^{2} k_j^m(i-1) \cdot u_j(i-l_j), \tag{11}$$

где $\varepsilon_p(i)$ – ошибка расчета выходного воздействия.

5. Входное воздействие объекта идентификации

$$u(i) = \begin{cases} 0 & \text{при } i \le 0; \\ 1 & \text{при } i > 0. \end{cases} \tag{12}$$

5. Момент останова алгоритма (9) – (11) (окончания одного цикла обработки) определяется с помощью неравенства:

$$i = \begin{cases} i^* & \text{при } \left|y(i) - y(i-1)\right| \le 0{,}01y(i); \\ i & \text{в остальных случаях}, \end{cases} \tag{13}$$

где i^* – момент времени выхода переходного процесса на установившееся значение.

6. Начальные условия

$$y(0) = u(0) = k_1^m(0) = k_2^m(0) = 0. \tag{14}$$

7. Критерий точности идентификации представлен для каждого коэффициента соотношением:

$$q_j = \left|k_j(i^*) - k_j^m(i^*)\right|; \qquad j = 1,2. \tag{15}$$

Требуется. 1. Найти оценки коэффициентов и оценить точность алгоритма идентификации на модельных данных.

При проведении численных исследований *u(i)* задавали в виде ступенчатых изменений в соответствии с выражением (12). Значения k и T для расчета реакции модельного объекта в виде кривой разгона выбирали из заданного диапазона изменения (2) с шагом $\Delta k = \Delta T = \Delta\tau = 0{,}1$. В процессе моделирования на каждом *i*-м шаге расчета определяли как значения $k_1^m(i)$ и $k_2^m(i)$, так и $T^m(i)$ и $k^m(i)$. Последние рассчитывали по выражениям:

$$T^m(i) = \frac{k_1^m(i)\Delta t}{1-k_1^m(i)}; \quad k^m(i) = \frac{k_2^m(i)}{1-k_1^m(i)}. \tag{16}$$

Оценку запаздывания l_2^m определяли как интервал времени от начала цикла моделирования ($i = 0$) до того момента i_l, когда начнет выполняться условие $k^m(i_l) \ne k^m(0)$. Значения l_2^m для всех исследованных условий совпадали с их действительными значениями l_u, поэтому в дальнейшем основное внимание уделяли исследованию близости оценок $k^m(i)$ и $T^m(i)$ к их действительным значениям.

В табл. 1 в качестве примера приведены некоторые результаты этих исследований. Всего в процессе численных исследований, исходя из диапазона изменения действительных значений коэффициентов (2) и шагов дискретности Δk и ΔT, был проведен 81 модельный эксперимент. В табл. 1 приведены результаты исследований для меньшего числа экспериментов, таких, значения коэффициентов k и T для которых были равны их крайним и средним значениям из указанного диапазона (2). Во всех исследованных случаях полученные оценки коэффициентов k^m и T^m были не равны их действительным значениям.

Таблица 1

Результаты первого этапа численных исследований

Коэффициенты / № эксперимента	*k*	k^m	$\lvert\delta k\rvert$, %	*T*	T^m	$\lvert\delta T\rvert$,%
1.	0,100	0,045	55	0,100	0,014	86
2.	0,100	0,135	35	0,500	0,680	36
3.	0,100	0,018	82	1,00	1,400	40
4.	0,500	0,821	64	0,1	0,19	90
5.	0,500	0,26	48	0,5	0,75	50
6.	0,500	0,19	62	1,0	0,38	62
7.	1,0	0,0910	91	0,1	0,26	160
8.	1.0	0,38	62	0,5	1,5	200
9.	1,0	0,11	89	1.0	0,77	23

Поэтому по результатам первого этапа исследований алгоритмов идентификации на базе ЗДС для динамических объектов, модели которых представлены в виде последовательного соединения инерционного звена первого порядка с звеном чистого запаздывания, сделан вывод о том, что в результате обработки данных, представленных в виде кривой разгона, получены смещенные, значительно отличающиеся от действительных значений, оценки коэффициентов k^m и T^m. Такие результаты можно объяснить наличием тесной, практически функциональной связи между учитываемыми входными воздействиями модели u_1 и u_2.

Выход из такой ситуации возможен за счет формирования такого исследовательского воздействия на объект идентификации, при котором значения $u_1(i) = y(i-1)$ и $u_2(i) = u(i)$ будут не связаны друг с другом. Таким требованиям удовлетворяет входное воздействие, представленное в виде псевдослучайной двоичной белой последовательности, нормированная автокорреляционная функция которой близка к нулю.

Поэтому постановка второй задачи отличалась от первой тем, что вместо скачкообразного входного воздействия (12) на вход модельного объекта исследования (1) подавали воздействие в виде псевдослучайной двоичной белой последовательности:

$$u(i) = a_1u(i-1) + a_2u(i-2) + \cdots + a_nu(i-N), \qquad (17)$$

где *u* и *a* принимают значения 0 или 1, и сложение производится по правилу

$$\begin{cases} 0+0=0 \\ 1+0=1 \\ 1+1=1; \end{cases} \qquad (18)$$

N – интервал моделирования; значения задаются произвольно в виде начальной последовательности из N членов, а значения параметра a заданы специальной таблицей [6]. В основу алгоритма формирования такой последовательности была положена схема, описанная в [6].

Действительные значения коэффициентов модельного объекта (1) были взяты такими же, как и для первой задачи исследований. Часть результатов численных исследований для тех же значений коэффициентов k и T, что и в табл. 1, приведена в табл. 2. Из приведенных в табл. 2 данных видно, что модельные значения коэффициентов сошлись к действительным без ошибок для всех их исследованных значений.

Постановка третьей задачи отличалась от второй тем, что вместо детерминированного модельного объекта (1) исследовался объект в условиях неопределенности, вызванной наличием эффектов влияния неконтролируемых возмущений. Для этого в модель дополнительно ввели случайную составляющую ε, т. е. модельный объект идентификации был представлен выражениями

$$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t-\tau_u) + \varepsilon(t), \qquad (19)$$

$$\varepsilon(t) = \pm\xi \cdot \vartheta(t) \cdot y_{\text{ср}}, \qquad (20)$$

где $\varepsilon(t)$ – эффекты влияния неконтролируемых возмущений; ξ – масштабный коэффициент, задаваемый исследователем; $\vartheta(t)$ – значение в момент времени *t* случайного процесса, подчиненного нормальному закону распределения вероятностей и изменяющегося в диапазоне от нуля до единицы; $y_{\text{ср}}$ – среднее значение выходного воздействия, оцениваемое на интервале моделирования *N*.

При оценивании влияния эффектов неконтролируемых возмущений ε на результаты идентификации численные исследования алгоритма на базе ЗДС были направлены на то, чтобы установить максимально возможный уровень $\varepsilon(t)$, при котором модельные оценки параметров будут различаться от действительных не более чем на 5 % без дополнительной обработки исходных данных, направленной на уменьшение $\varepsilon(t)$. Для расчета реакции модельного объекта на псевдослучайную белую двоичную последовательность выражение (19), так же, как и в предыдущих случаях, было представлено в дифференциально-разностной форме, а выражение (20) в дискретной

$$y\ (i) = k_1 y\ (i-1) + k_2 u(i - l_u) + \varepsilon(i); \tag{21}$$

$$\varepsilon(i) = \pm\xi \cdot \vartheta(i) \cdot y_{\text{ср}} \tag{22}$$

Таблица 2

Результаты второго этапа исследования

Коэффициенты / № эксперимента	k	k^m	$\left|\delta k\right|$,%	T	T^m	$\left|\delta T\right|$,%
1.	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0
2.	0,1	0,1	0	0,5	0,5	0
3.	0,1	0,1	0	0,9	0,9	0
4.	0,5	0,5	0	0,1	0,1	0
5.	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
6.	0,5	0,5	0	0,9	0,9	0
7.	0,9	0,9	0	0,1	0,1	0
8.	0,9	0,9	0	0,5	0,5	0
9.	0,9	0,9	0	0,9	0,9	0

Результаты исследований приведены в табл. 3. Здесь в соответствующих столбцах приведены оценки коэффициентов T^m и k^m (при их действительных значениях k = 0,9 и T = 0,5) при различных значениях масштабного коэффициента ξ, значения которого определяют уровень эффектов неконтролируемых возмущений, а также их ошибки

$$\left|\delta k\right| = \left|k - k^m\right|; \quad \left|\delta T\right| = \left|T - T^m\right|,$$

выраженные в процентах от их действительных значений. В последних двух столбцах таблицы приведены диапазоны изменения этих ошибок $D_1 = \left[\delta T^{\min} \div \delta T^{\max}\right]$ и $D_2 = \left[\delta k^{\min} \div \delta k^{\max}\right]$, полученные по результатам всех проведенных при решении третьей задачи экспериментов, число которых также равно 81.

Таблица 3

Влияние ξ на результат идентификации

Коэффициенты / ξ	T	T^m	$\left|\delta T\right|$, %	k	k^m	$\left|\delta k\right|$,%	D_1	D_2
0,01	0,900	0,900	0	0,500	0,498	0,4	0,0-0,5	0,3-0,7
0,02	0,900	0,910	1,1	0,500	0,495	0,9	0,8-1,3	0,7-1,2
0,03	0,900	0,882	2,0	0,500	0,490	2,0	1,8-2,2	1,9-2,3
0,04	0,900	0,871	3,2	0,500	0,488	2,3	3,0-3,4	2,3-2,7
0,05	0,900	0,865	3,8	0,500	0,484	2,7	3,7-4,0	2,5-2,8
0,06	0,900	0,862	4,2	0,500	0,515	3,0	4,0-4,4	2,9-3,3
0,07	0,900	0,941	4,4	0,500	0,519	3,8	4,3-4,6	3,5-3,8
0,08	0,900	0,940	4,5	0,500	0,520	4	4,5-4,7	3,9-4,2
0,09	0,900	0,943	4,7	0,500	0,478	4,4	4,6-4,9	4,3-4,8

Продолжение таблицы 3

0,10	0,900	0,945	5,0	0,500	0,524	4,8	4,9-5,4	4,7-5,0
0,11	0,900	0,991	12,2	0,500	0,437	12,6	11,9-12,4	12,0-12,6
0,12	0,900	0,771	14,4	0,500	0,582	16,4	14,2-14,7	16,0-16,5
0,13	0,900	1,095	22,8	0,500	0,374	25,2	22,1-22,9	24,5-25,3

Как видно из данных табл. 3, при увеличении уровня эффектов влияния неконтролируемых возмущений выше 10 % ошибки оценивания коэффициентов резко возрастают. Таким образом, оценки параметров T^m и k^m модели (19) будут соответствовать действительным значениям с требуемой точностью, если эффекты влияния прочих факторов будут изменяться в диапазоне, не большем, чем $[(-0{,}09 \div -0{,}10) \cdot y_{ср}; (0{,}09 \div 0{,}10) \cdot y_{ср}]$.

Выводы. На основе проведенных численных исследований алгоритма идентификации на базе замкнутых динамических систем сделаны выводы.

1. Применение алгоритма идентификации на базе ЗДС не позволило получить несмещенные оценки параметров динамической модели исследуемой структуры в случае обработки данных, представленных в виде кривых разгона.

2. Формирование исследовательского воздействия в виде псевдослучайной белой двоичной последовательности (при отсутствии эффектов влияния неконтролируемых возмущений) позволило получить несмещенные оценки параметров динамической модели T^m и k^m для всего диапазона их исследованных значений.

3. С помощью алгоритма идентификации на базе ЗДС, функционирующего при наличии эффектов влияния неконтролируемых возмущений, получены удовлетворительные результаты для условий, когда значения эффектов неконтролируемых возмущений не превышают 10 % от среднего значения выходной переменной.

Литература

1. Синтез идентификаторов в виде замкнутых динамических систем / Л. П. Мышляев, Д. А. Агеев, К. Г. Венгер, С. В. Чернявский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 12. – С. 60 – 62

2. Райбман, Н. С. Построение моделей процессов производства / Н. С. Райбман, В. М. Чадеев. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.

3. О численном моделировании алгоритмов идентификации, построенных на основе замкнутых динамических систем / Л. П. Мышляев, Д. А. Агеев, К. Г. Венгер и др. // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды IV Всесоюзной научно-практической конференции / под общ. ред. проф. В. Ю. Островлянчика. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. – С. 83 – 94.

4. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя // пер. с англ.; Л. Льюнг; под ред. Я. З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

5. Острем, К. Системы управления с ЭВМ / К. Острем, Б. Виттенмарк. – М.: Мир, 1987.

6. Ротач, В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В. Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.