

А.А. Минко

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА ПО РЕАКЦИИ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СИГНАЛ

*Предложен алгоритм обобщенной идентификации на основе интегральных двухпараметрических преобразований Гаусса линейного стационарного объекта по его реакции на синусоидальный сигнал. Проведена экспериментальная проверка работоспособности разработанного алгоритма, подтверждающая его весьма высокую эффективность.*

**Введение.** Рассмотрим задачу идентификации объекта, допускающего описание линейным дифференциальным уравнением (ЛДУ)

$$\sum_{i=0}^n a_i p^{n-i} y(t) = \sum_{j=0}^m b_j p^{m-j} v(t), \quad (1)$$

$$p \equiv \frac{d}{dt}, 0 \leq m \leq n-1, n = \overline{0, 10},$$

по оценкам  $\hat{v}(t), \hat{y}(t), t \in [0, T]$  сигналов  $v(t), y(t), t \in [0, T], T < \infty$  на его входе и выходе. Будем считать задачу идентификации решенной, если определено ДУ модели

$$\sum_{i=0}^{m_1} a_i p^{n_1-i} y_M(t) = \sum_{j=0}^{m_1} b_j p^{m_1-j} v(t), \quad (2)$$

$$p \equiv \frac{d}{dt}, 0 \leq m_1 \leq n_1 - 1, n_1 = \overline{0, 10},$$

решение  $y_M(t), t \in [0, T]$  которого удовлетворяет критерию

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{y}(t) - y_M(t)| dt \leq E_{\text{зад}}. \quad (3)$$

Предполагается, что оценки

$$\begin{aligned} \hat{v}(t) &= v(t) + n_v(t); \\ \hat{y}(t) &= y(t) + n_y(t), t \in [0, T], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n_v(t), n_y(t)$  - помехи, обусловленные рядом факторов, заданы на множестве  $t_i \in [0, T], t_i < t_j$  при  $i < j, i, j = \overline{0, n}$  в виде сеток  $[t_i, \hat{v}_i]_0^n, [t_j, \hat{y}_j]_0^n$ .

Типовой прием решения поставленной задачи, используемый в большинстве публикаций по этой тематике, состоит в следующем [1]. На первом этапе сигналы, фигурирующие в ДУ (1), заменяются их интегральными преобразованиями, что позволяет алгебраизовать ДУ. На втором этапе из интегральных преобразований, вычисляемых по сеткам  $[t_i, \hat{v}_i]_0^n, [t_j, \hat{y}_j]_0^n$  при фиксированных параметрах интегральных преобразований, формируется система алгебраических уравнений (СЛАУ), линейная относительно неизвестных параметров модели (2). Решение СЛАУ

позволяет определить параметры модели (2) и в дальнейшем оценить их пригодность согласно условию (3).

**Постановка задачи.** Рассмотрим алгоритм идентификации линейного стационарного объекта на основе преобразований Гаусса по его реакции на гармонический  $v(t) = \sin \omega t$  сигнал. Предположим, что объект стартует из нулевых начальных условий. Известно [2], что преобразованием Гаусса порядка « $k$ » функции  $x(t), t \in R$  называются интегральные двухпараметрические функции вида

$$G_x^{(k)}(r, s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) Q_k(t-r, s) dt, \quad (5)$$

$$r \in R, s \in R^+, R^+ = \{t: 0 \leq t < \infty\},$$

где

$$Q_k(t-r, s) = (-1)^k \frac{d^k}{dt^k} e^{-\frac{(t-r)^2}{2s}}, k = 0, 1, 2, \dots -$$

ядра интегральных преобразований. Параметр  $r$  определяет величину сдвига ядра, а  $s$  задает длительность интервала, на котором  $|Q_m| \geq \varepsilon$ , где  $\varepsilon \leq 10^{-4}$ . Таким образом, преобразования Гаусса определены на всех точках полуплоскости  $R_+^2 = R \times R^+$ . Результаты моделирования показали, что начальное значение параметра сдвига ядра  $r$  преобразований Гаусса целесообразно выбирать в начале переходного процесса, а необходимая последовательность  $r_i, i = \overline{1, 10}$  должна быть локализована примерно на его первой половине. Начальное значение параметра  $s$  рекомендуется выбирать равным единице: в большинстве случаев оно же является вполне приемлемым.

Преобразования Гаусса (5) для сетчатых функций определяются по формулам численного интегрирования (средних трапеций, Симпсона и т.д.), что предполагает квантование сигналов вход-выход объекта с достаточно малым шагом. Интервал  $[0, T]$  считаем достаточно протяжен-

ным, так что имеется возможность выбора точек  $(r_i, s_i) \in R_+^2$ , когда  $Q_m(t - r_i, s) = 0, m = \overline{0, 11}$  при  $t \geq T$ .

Учет финитности входного и выходного сигналов позволяет рассматривать их в виде

$$x(t) = x_p(t)l_T(t), \quad (6)$$

где  $x_p$  – регулярная функция, заданная на открытом интервале  $(0, T)$ , а

$$l_T(t) = \begin{cases} 1(t), t \in (0, T), \\ 0, t \notin [0, T] \end{cases} \quad (7)$$

финитный единичный скачок. Характер изменения сигналов в точках 0 и T в данной работе не рассматривается. Производные финитных функций порядка «к», входящие в выражение (1), вычисляются по формуле [3]:

$$x^{(k)}(t) = x_p^{(k)}(t)l_T(t) + \sum_{i=1}^k x_p^{(k-i)}(0)\delta^{(i-1)}(t) - \sum_{i=1}^k x_p^{(k-i)}(T)\delta^{(i-1)}(t-T), \quad (8)$$

где  $x_p^{(k-i)}(0)\delta^{(i-1)}(t)$  – составляющая, содержащая постначальные фазовые координаты объекта, а  $x_p^{(k-i)}(T)\delta^{(i-1)}(t-T)$  – составляющая, содержащая предоконечные фазовые координаты. Для определения неизвестных параметров  $a_i, b_j$  модели (1) объекта необходимо на его вход подать информативный сигнал. Известно [1], что одним из таких возбуждающих сигналов является синусоида. Приведем варианты алгоритма идентификации на основе преобразований Гаусса рассматриваемого объекта по его реакции на синусоидальный сигнал при нулевых начальных условиях.

**Теоретические исследования.** Для объекта, описываемого ДУ первого порядка, выражение (1) принимает вид

$$a_0(y_p'(t)l(t) + y_p(0)\delta(t)) + y_p(t)l(t) = b_0 \sin \omega t l(t). \quad (9)$$

Сравнивая регулярные и сингулярные (содержат  $\delta$  – функцию или ее производные) составляющие в левой и правой частях ДУ (9), получаем условия:

$$\begin{aligned} a) a_0 y_p(0) \delta(t) = 0 &\rightarrow y_p(0) = 0, a_0 \neq 0; \\ б) a_0 y_p'(t) l(t) + y_p(t) l(t) &= b_0 \sin \omega t l(t), \quad (10) \\ t \in (0, T), \end{aligned}$$

обеспечивающие тождественность ЛДУ (9) на всей числовой оси. Проекция ДУ(10,б) на координатные функции Гаусса  $Q_m(t - r, s), m = \overline{0, 1, \dots}$  определяются алгебраическими уравнениями

$$a_0(G_y^{(m+1)}(r, s) - y_p(0)Q_m(-r, s)) + G_y^{(m)}(r, s) = b_0 G_{\sin}^{(m)}, m = \overline{0, 1, 2, \dots}, \quad (11)$$

где  $G_y^{(m)}(r, s)$  – преобразование Гаусса  $m$ -го порядка сигнала  $y_p(t)$ . На их основе с учетом начального условия (10,а) формируем СЛАУ

$$\begin{pmatrix} G_y^{(1)} & -G_{\sin}^{(0)} \\ G_y^{(2)} & -G_{\sin}^{(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} = (-1) \begin{pmatrix} G_y^{(0)} \\ G_y^{(1)} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

решением которой является вектор неизвестных параметров  $P = (a_0 \ b_0)^T$  модели объекта. Найденный вектор  $P$  при начальных условиях, обусловленных выражением (10,а), позволяет, численно решив ДУ (10,б), получить предоконечное значение  $y(T-)$  сигнала  $y_p(t)$ , которое, в свою очередь, будет являться начальным условием для ДУ

$$a_0 y'(t) + y(t) = b_0 v(t), t \in (T, \infty), \quad (13)$$

решение которого есть реакция объекта на произвольный входной сигнал  $v(t), t \in (T, \infty)$ .

Рассмотренный вариант алгоритма справедлив для объектов, описываемых ЛДУ до четвертого порядка включительно.

Далее рассмотрим вариант алгоритма обобщенной идентификации более сложных объектов:  $n = 5, 6$ .

Для объекта, описываемого ДУ пятого порядка, ЛДУ (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^4 a_i \left( y_p^{(5-i)}(t)l(t) + \sum_{j=0}^{4-i} y_p^{(4-i-j)}(0)\delta^{(j)}(t) \right) + \\ + y_p(t)l(t) = b_4 \sin \omega t + \\ + \sum_{k=0}^3 b_k \left( \sin^{(4-k)} \omega t l(t) + \sum_{l=0}^{3-k} \sin^{(3-k-l)}(0)\delta^{(l)}(t) \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Сравнивая регулярные и сингулярные составляющие в левой и правой частях ДУ (14), получаем условия:

$$\begin{aligned} а) a_0 y_p(0) \delta^{(4)}(t) &= 0; \\ б) a_0 y_p'(0) \delta'''(t) &= 0; \\ в) a_0 y_p''(0) \delta''(t) &= b_0 \omega \delta''(t); \\ г) \sum_{i=0}^1 a_i y_p^{(3-i)}(0) \delta'(t) &= b_1 \omega \delta'(t); \quad (15) \\ д) \sum_{i=0}^2 a_i y_p^{(4-i)}(0) \delta(t) &= (-b_0 \omega^3 + b_2 \omega) \delta(t); \\ е) \sum_{i=0}^5 a_i y_p^{(5-i)}(t) l(t) &= \sum_{j=0}^4 b_j \sin^{(4-j)} \omega t l(t), \\ а_5 &= 1, \end{aligned}$$

обеспечивающие тождественность ДУ (14) на всей числовой оси. Проекция ДУ (15,е) на коор-

динатные функции  $Q_m(t-r, s), m=0, 1, 2, \dots$  с учетом условий (15,а÷д) позволяют сформировать блочную СЛАУ

$$\begin{pmatrix} G_y^{15} & -G_{\sin}^{14} \\ G_y^{25} & -G_{\sin}^{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_5 \\ B_5 \end{pmatrix} = (-1) \begin{pmatrix} G_y^{10} \\ G_y^{20} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где блоки определяются как

$$\begin{aligned} G_y^{i5} &= \begin{pmatrix} G_y^{(5)}(r_i, s_i) \dots G_y^{(1)}(r_i, s_i) \\ \vdots \\ G_y^{(9)}(r_i, s_i) \dots G_y^{(5)}(r_i, s_i) \end{pmatrix}; \\ G_{\sin}^{i4} &= \begin{pmatrix} G_{\sin}^{(4)}(r_i, s_i) \dots G_{\sin}^{(0)}(r_i, s_i) \\ \vdots \\ G_{\sin}^{(8)}(r_i, s_i) \dots G_{\sin}^{(4)}(r_i, s_i) \end{pmatrix}; \\ G_y^{i0} &= \begin{pmatrix} G_y^{(0)}(r_i, s_i) \\ \vdots \\ G_y^{(4)}(r_i, s_i) \end{pmatrix}, i=1,2; \end{aligned} \quad (17)$$

$$A_5 = (a_0 \dots a_4)^T; B_5 = (b_0 \dots b_4)^T.$$

Как видно из выражений (17), в рассматриваемом случае возникает необходимость выбора двух значений параметров  $r$  и  $s$  преобразований Гаусса. В противном случае пришлось бы вычислять преобразования Гаусса двенадцатого и более порядков, что привело бы к погрешностям счета из-за вычислений полиномов Эрмита высокого порядка.

Если ранг матрицы системы (16) равен десяти, то ее решение позволит получить вектор  $P = (A_5 B_5)^T$ , а затем вычислить начальные условия

$$\begin{aligned} y_p(0) &= 0; y'_p(0) = 0; \\ y''_p(0) &= \frac{b_0}{a_0} \omega; \\ y'''_p(0) &= \frac{b_1}{a_0} \omega - \frac{a_1 b_0}{a_0} \omega; \\ y^{(4)}_p(0) &= -\frac{b_0}{a_0} \omega^3 + \frac{b_2}{a_0} \omega - \\ & - \frac{a_1}{a_0} y'''_p(0) - \frac{a_2}{a_0} y''_p(0) \end{aligned} \quad (18)$$

для ДУ (15,е), решив которое каким-либо численным методом, получим вектор  $Y(T-) = (y_p(T-) \dots y_p^{(4)}(T-))^T$  редоконечных значений фазовых координат объекта, который, в свою очередь, будет использоваться в качестве начальных условий для ДУ

$$\sum_{i=0}^5 a_i y^{(5-i)}(t) = \sum_{j=0}^4 b_j v^{(4-j)}(t), \quad (19)$$

$$a_5 = 1, t \in (T, \infty)$$

при произвольном входном сигнале  $v(t), t \in (T, \infty)$ .

Подробно рассмотренную методику и алгоритм идентификации объекта, описываемого ДУ начальных порядков по реакции на синусоидальный сигнал, нетрудно обобщить и на те случаи, когда порядок модели объекта  $n = \overline{7, 10}$ .

Так, для объекта, описываемого ДУ восьмого порядка, ЛДУ (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^7 a_i \left( y_p^{(8-i)}(t) l(t) + \sum_{j=0}^{7-i} y_p^{(7-i-j)}(0) \delta^{(j)}(t) \right) + \\ + y_p(t) l(t) = b_7 \sin \omega t + \\ + \sum_{k=0}^6 b_k \left( \sin^{(7-k)} \omega t l(t) + \sum_{l=0}^{6-k} \sin^{(6-k-l)}(0) \delta^{(l)}(t) \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Сравнивая регулярные и сингулярные составляющие в левой и правой частях ДУ (20), получаем следующие условия:

$$\begin{aligned} а) a_0 y_p(0) \delta^{(7)}(t) &= 0; \\ б) a_0 y'_p(0) \delta^{(6)}(t) &= 0; \\ в) a_0 y''_p(0) \delta^{(5)}(t) &= b_0 \omega \delta^{(5)}(t); \\ г) \sum_{i=0}^1 a_i y_p^{(3-i)}(0) \delta^{(4)}(t) &= b_1 \omega \delta^{(4)}(t); \\ д) \sum_{i=0}^2 a_i y_p^{(4-i)}(0) \delta^{(3)}(t) &= (-b_0 \omega^3 + b_2 \omega) \delta^{(3)}(t); \\ е) \sum_{i=0}^3 a_i y_p^{(5-i)}(0) \delta^{(2)}(t) &= -b_1 \omega^3 \delta^{(2)}(t); \\ ж) \sum_{i=0}^4 a_i y_p^{(6-i)}(0) \delta^{(1)}(t) &= (b_0 \omega^5 - b_2 \omega^3 + b_4 \omega) \delta^{(1)}(t); \\ з) \sum_{i=0}^5 a_i y_p^{(7-i)}(0) \delta(t) &= (b_1 \omega^5 - b_3 \omega^3 + b_5 \omega) \delta(t); \\ и) \sum_{i=0}^8 a_i y_p^{(8-i)}(t) l(t) &= \sum_{j=0}^7 b_j \sin^{(7-j)} \omega t l(t), \end{aligned} \quad (21)$$

$a_8 = 1$ , обеспечивающие тождественность ДУ (20) на всей числовой оси. Проекция ДУ (21,и) на координатные функции  $Q_m(t-r, s), m=0, 1, 2, \dots$  с учетом условий (21,а÷з) позволяют сформировать блочную СЛАУ

$$\begin{pmatrix} G_y^{18} & -G_{\sin}^{17} \\ \vdots \\ G_y^{48} & -G_{\sin}^{47} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_8 \\ B_8 \end{pmatrix} = (-1) \begin{pmatrix} G_y^{10} \\ \vdots \\ G_y^{40} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где блоки определяются выражениями

$$\begin{aligned}
 G_y^{i8} &= \begin{pmatrix} G_y^{(8)}(r_i, s_i) \dots G_y^{(1)}(r_i, s_i) \\ \vdots \\ G_y^{(11)}(r_i, s_i) \dots G_y^{(4)}(r_i, s_i) \end{pmatrix}; \\
 G_{\sin}^{i7} &= \begin{pmatrix} G_{\sin}^{(7)}(r_i, s_i) \dots G_{\sin}^{(0)}(r_i, s_i) \\ \vdots \\ G_{\sin}^{(10)}(r_i, s_i) \dots G_{\sin}^{(3)}(r_i, s_i) \end{pmatrix}; \\
 G_y^{i0} &= \begin{pmatrix} G_y^{(0)}(r_i, s_i) \\ \vdots \\ G_y^{(3)}(r_i, s_i) \end{pmatrix}, i = \overline{1,4}; \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$A_8 = (a_0 \dots a_7)^T; B_8 = (b_0 \dots b_7)^T.$$

В этом случае возникает необходимость выбора уже четырех значений параметров  $r$  и  $s$  преобразований Гаусса.

Если ранг матрицы системы (22) равен шестнадцати, то ее решение позволит получить вектор  $P = (A_8 B_8)^T$ , а затем вычислить начальные условия

$$y_p(0) = 0;$$

$$y'_p(0) = 0;$$

$$y''_p(0) = \frac{b_0}{a_0} \omega;$$

$$y'''_p(0) = \frac{b_1}{a_0} \omega - \frac{a_1 b_0}{a_0} \omega;$$

$$y^{(4)}_p(0) = \frac{1}{a_0} \left( b_2 \omega - b_0 \omega^3 - \sum_{i=1}^2 a_i y_p^{(4-i)}(0) \right);$$

$$y^{(5)}_p(0) = \frac{1}{a_0} \left( b_3 \omega - b_1 \omega^3 - \sum_{i=1}^3 a_i y_p^{(5-i)}(0) \right);$$

$$y^{(6)}_p(0) = \frac{1}{a_0} \left( b_4 \omega - b_2 \omega^3 + b_0 \omega^5 - \sum_{i=1}^4 a_i y_p^{(6-i)}(0) \right);$$

$$y^{(7)}_p(0) = \frac{1}{a_0} \left( b_5 \omega - b_3 \omega^3 + b_1 \omega^5 - \sum_{i=1}^5 a_i y_p^{(7-i)}(0) \right)$$

для ДУ (21,и), решив которое каким-либо численным методом, получим вектор  $Y(T-) = (y_p(T-) \dots y_p^{(7)}(T-))^T$  предоконечных значений фазовых координат объекта, который, в свою очередь, будет использоваться в качестве начальных условий для ДУ

$$\sum_{i=0}^8 a_i y^{(8-i)}(t) = \sum_{j=0}^7 b_j v^{(7-j)}(t), \quad (24)$$

$$a_8 = 1, t \in (T, \infty)$$

при произвольном входном сигнале  $v(t), t \in (T, \infty)$ .

Предложенный алгоритм обобщенной идентификации на основе преобразований Гаусса

линейного стационарного объекта допускает обобщение и на случаи ненулевых начальных условий.

**Экспериментальные исследования.** Возьмем сгенерированный случайным образом ДУ объекта пятого порядка

$$\sum_{i=0}^5 a_i p^{5-i} y(t) = \sum_{j=0}^4 b_j p^{4-j} v(t), a_5 = 1, t \in (0, T),$$

операторы передаточной функции которого явно имеют вид

$$\begin{aligned}
 B(p) &= -2,764 p^4 - 4,03 p^3 + 3,006 p^3 - \\
 &- 0,9471 p - 1,255; \\
 A(p) &= 2,161 p^5 + 7,745 p^4 + 12,54 p^3 + \\
 &+ 17,17 p^2 + 8,318 p + 1.
 \end{aligned} \quad (25)$$

Подадим на вход полученного объекта сигнал  $v(t) = \sin \omega t$  и с помощью какого-либо решателя получим выходной сигнал  $y(t), t \in (0, 25)$ . Воспользовавшись предложенным в данной работе алгоритмом и выбрав параметры  $r=0$  и  $s=0,5$  преобразований Гаусса, а также шаг изменения параметра  $r$  равным 1, получим банк моделей (до десятого порядка), из которых выбирается одна на основе критерия (3). Операторы передаточной функции полученной в результате идентификации модели объекта имеют вид

$$\begin{aligned}
 B(p) &= -2,764 p^4 - 4,03 p^3 + 3,006 p^3 - \\
 &- 0,9476 p - 1,255; \\
 A(p) &= 2,161 p^5 + 7,746 p^4 + 12,54 p^3 + \\
 &+ 17,17 p^2 + 8,318 p + 1,
 \end{aligned} \quad (26)$$

значение критерия (3) -  $J = 3,8 \times 10^{-5}$ .

Наложим на выходной сигнал объекта (25) аддитивный гауссовский шум с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением, равным 0,005. Теперь необходимо идентифицировать объект по входному сигналу  $v(t) = \sin \omega t$  и оценке  $\hat{y}(t) = y(t) + n_y$  выходного сигнала. Воспользовавшись вышеизложенным алгоритмом и выбрав параметры  $r=0,5$  и  $s=0,7$  преобразований Гаусса, а также шаг изменения параметра  $r$  равным 0,5, получим банк моделей (до десятого порядка), из которых выбирается одна на основе критерия (3). Операторы передаточной функции полученной модели имеют вид

$$\begin{aligned}
 B(p) &= -0,1463 p^5 - 0,2838 p^4 + 1,054 p^3 - \\
 &- 1,1381 p^3 + 1,679 p - 1,188; \\
 A(p) &= 0,1198 p^6 + 0,4625 p^5 + 1,747 p^4 + \\
 &+ 4,038 p^3 + 4,717 p^2 + 5,678 p + 1,
 \end{aligned} \quad (27)$$

значение критерия (3) -  $J = 0,0456$ . Из выражения (27) следует, что передаточная функция модели имеет шестой, а не пятый, как у объекта, порядок. На рисунке 1 представлены входной сигнал объекта, выходной сигнал идентифицированной модели  $y_M(t)$  и выходной  $\hat{y}(t)$  зашумленный сигнал объекта.

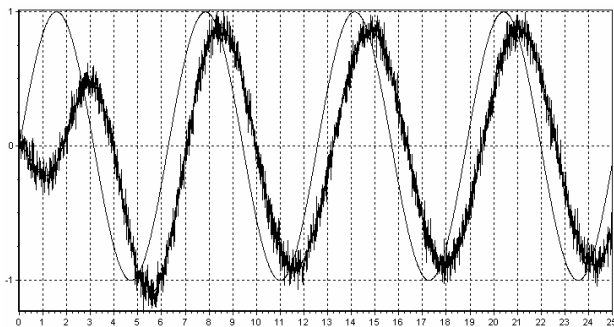


Рисунок 1 – Графики  $v(t), y_M(t), \hat{y}(t)$

На рисунке 1 видно, что выходной сигнал  $y_M(t)$  полученной модели повторяет характер изменения зашумленного выходного сигнала  $\hat{y}(t)$  объекта. Для большей наглядности представим укрупненный фрагмент данных графиков на рисунке 2.

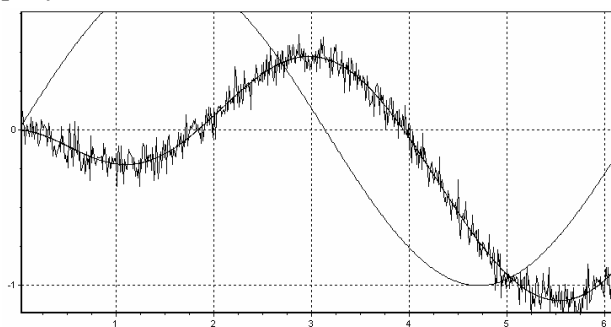


Рисунок 2 – Отдельный фрагмент рисунка 1

На рисунке 2 уже отчетливо видно, что выходной сигнал идентифицированной модели  $y_M(t)$  фактически является аппроксимацией математического ожидания выходного  $\hat{y}(t)$  зашумленного сигнала системы.

Теперь возьмем сгенерированный случайным образом объект десятого порядка

$$\sum_{i=0}^{10} a_i p^{10-i} y(t) = \sum_{j=0}^9 b_j p^{9-j} v(t), a_{10} = 1, t \in (0, T),$$

операторы передаточной функции которого явно имеют вид

$$B(p) = -0,0008629p^9 - 0,0151p^8 - 0,1026p^7 - 0,4267p^6 - 1,161p^5 - 1,907p^4 - 1,616p^3 - 0,3525p^2 + -0,329p + 0,1596;$$

$$A(p) = 0,0005617p^{10} + 0,007228p^9 + 0,05829p^8 + 0,3188p^7 + 1,214p^6 + 3,368p^5 + 6,833p^4 + 9,654p^3 + 8,771p^2 + 4,529p + 1.$$

Подадим на вход полученного объекта сигнал  $v(t) = \sin \omega t$  и с помощью какого-либо решателя получим выходной сигнал  $y(t), t \in (0, 20)$ .

Воспользовавшись предложенным в данной работе алгоритмом и выбрав параметры  $r=0$  и  $s=0,6$  преобразований Гаусса, а также шаг изменения параметра  $r$  равным 0,6, получим банк моделей, из которых выбирается одна на основе критерия (3). Операторы передаточной функции полученной в результате идентификации модели объекта имеют вид

$$B(p) = -0,000863p^9 - 0,01511p^8 - 0,1027p^7 - 0,4272p^6 - 1,163p^5 - 1,913p^4 - 1,626p^3 - 0,3726p^2 + -0,3214p + 0,1547;$$

$$A(p) = 0,0005617p^{10} + 0,007228p^9 + 0,05829p^8 + 0,3188p^7 + 1,214p^6 + 3,368p^5 + 6,833p^4 + 9,654p^3 + 8,771p^2 + 4,529p + 1,$$

значение критерия (3) -  $J = 0,00025$ .

Приводить графики выходного сигнала  $y_M(t)$  полученной модели и выходного сигнала  $y(t), t \in (0, 20)$  исходного объекта нет смысла, поскольку они фактически неразличимы в данном формате.

**Выводы.** В статье предлагается новый метод идентификации, основанный на двухпараметрических интегральных преобразованиях Гаусса, позволяющих осуществлять удобную алгебраизацию ЛДУ, описывающего динамику объекта. Приведены конкретные алгоритмы идентификации при входном синусоидальном сигнале для моделей, относящихся к разным уровням сложности, позволяющие определить коэффициенты ЛДУ объекта и векторы его фазовых координат в постоконечный момент времени. Данный подход позволяет далее решать задачу управления объектом согласно идее дуального управления Фельдбаума. Его удалось реализовать за счет предложенных в работе модификаций ЛДУ, задающих финитный выходной сигнал при финитном входе. Рекомендуется использование разработанной методики для контроля численного решения линейных ДУ.

#### Библиографический список

1. Л. Льюнг Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 431 с.
2. Уваев А.И., Минко А.А. Исследование преобразований Гаусса гармонических сигналов. Проблемы математического моделирования и обработки инфор-

мации в научных исследованиях: сборник научных трудов. Рязань, 1999. С. 83-88.

3. Уваев А.И., Минко А.А. Особенности обобщенной параметрической идентификации объектов управления на основе модели вход-выход. Новые ин-

формационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции студентов. РГРТУ.2007. С.210-213.