УДК 681.5.015 DOI: 10.65599/III3823

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПОСТОЯННЫМИ И ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

У.Х. Джалолов, Р.М. Бандишоева, М.А. Бадалова, Ш.Ё. Холов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

Статья посвящена исследованию проблемы параметрической идентификации управляемых динамических систем в режиме их нормальной работы с использованием модели с настраиваемыми параметрами, сформированные на базе метода интегральной модуляции. Особенность работы заключается в придании процедуре идентификации адаптивных свойств, что позволяет минимизировать негативное влияние «раскачивания» контролируемого объекта при изменении его параметров. Для многих технологических процессов (ТП) (старение катализаторов в химической технологии, износ мелющих тел в мелющих агрегатах, изменение слоя покрытия во вращающихся печах) параметры моделей изменяются неконтролируемым образом во времени в широком диапазоне. Это приводит к необходимости текущей идентификации объектов управления (ОУ) с целью реструктуризации параметров регуляторов. Перспективой решения проблемы является разработка надежных методов для автоматического расчета параметров систем идентификации. Учитывая современные тенденции, такие методы могут быть ориентированы на использование компьютерного моделирования и численной оптимизации. В основе данного исследования лежит метод идентификации с использованием адаптивных моделей в варианте, не требующем отключения регулятора. Исследуется подход к обработке сигналов, основанный на вейвлето-подобных финитных функциях, являющейся ядрами оператора интегрирования.

***Ключевые слова**: идентификация, метод интегральной модуляции, финитные функции, параметрический наблюдатель, моделирование.*

СИСТЕМАИ АДАПТИВИИ ПАРАМЕТРИКӢ БАРОИ МУАЙЯН КАРДАНИ ОБЪЕКТҲОИ ДИНАМИКӢ БО ПАРАМЕТРҲОИ ДОИМӢ ВА ТАҒЙИРЁБАНДА

У.Х. Ҷалолов, Р.М. Бандишоева, М.А. Бадалова, Ш.Ё. Холов

Дар ин мақола масъалаи муайянкунии параметрии системаҳои динамикии идорашаванда ҳангоми кори муқаррарии онҳо бо истифода аз модел бо параметрҳои танзимшаванда, ки ба усули модулятсияи интегралӣ асос ёфтаанд, баррасӣ мешавад. Хусусияти асосии ин кор хусусияти мутобиқшавандаи тартиби муайянкунӣ мебошад, ки таъсири манфии "лағжиши" объекти идорашавандаро ҳангоми тағйир додани параметрҳои он ба ҳадди ақалл мерасонад. Барои бисёр равандҳои технологӣ (ТР) (пиршавии катализаторҳо дар муҳандисии кимиёвӣ, фарсудашавии муҳити майдакунӣ дар агрегатҳои майдакунӣ, тағирёбии қабати рӯйпӯш дар кӯраҳои чархзананда), параметрҳои модел дар тӯли вақт дар доираи васеъ ба таври беназорат тағйир меёбанд. Ин зарурати муайянкунии доимии объектҳои идоракуниро (СО) барои аз нав сохтор додани параметрҳои контроллерро ба вуҷуд меорад. Ҳалли умедбахши ин мушкилот таҳияи усулҳои боэътимод барои ҳисобкунии автоматии параметрҳои системаҳои муайянкунӣ мебошад. Бо назардошти тамоюлҳои ҷорӣ, чунин усулҳо метавонанд ба моделсозии компютерӣ ва беҳсозии рақамӣ такя кунанд. Ин таҳқиқот ба усули муайянкунӣ бо истифода аз моделҳои мутобиқшаванда дар версияе асос ёфтааст, ки хомӯш кардани контроллерро талаб намекунад. Равиши коркарди сигнал, ки ба функсияҳои маҳдуди монанд ба вейвлет асос ёфтааст, ки ядроҳои оператори интегратсия мебошанд, омӯхта мешавад.

***Калидвожаҳо:** муайянкунӣ, усули модулятсияи интегралӣ, функсияҳои маҳдуд, мушоҳидаи параметрӣ, моделиронӣ.*

A PARAMETRIC ADAPTIVE SYSTEM FOR IDENTIFYING DYNAMIC OBJECTS WITH CONSTANT AND VARIABLE PARAMETERS

U.H. Jalolov, R.M. Bandishoeva, M.A. Badalova, Sh.Yo. Kholov

This article examines the problem of parametric identification of controlled dynamic systems during their normal operation using a model with adjustable parameters based on the integral modulation method. A key feature of this work is the adaptive nature of the identification procedure, which minimizes the negative impact of the controlled object's "swaying" when its parameters change. For many technological processes (TP) (catalyst aging in chemical engineering, wear of grinding media in grinding units, coating layer changes in rotary kilns), model parameters vary uncontrollably over time over a wide range. This necessitates ongoing identification of control objects (CO) to restructure controller parameters. A promising solution to this problem is the development of reliable methods for automatically calculating the parameters of identification systems. Given current trends, such methods may rely on computer modeling and numerical optimization. This study is based on an identification method using adaptive models in a version that does not require controller shutdown. A signal processing approach based on wavelet-like finite functions, which are the kernels of the integration operator, is explored.

***Keywords:** Identification, integral modulation method, finite functions, parametric observer, modeling.*

Введение

Характеристика и идентификация систем являются ключевыми задачами теории систем, направленными на математическое описание объектов управления и определение их параметров [1, 2, 3]. Эти задачи особенно важны для динамических систем, где параметры могут изменяться во времени (например, старение катализаторов в химической технологии или износ оборудования). Современные подходы к идентификации систем активно используют методы машинного обучения, адаптивные алгоритмы и численную оптимизацию [4, 5].

Современные исследования фокусируются на разработке методов, которые обеспечивают высокую точность оценки параметров даже при наличии шумов и нестационарности параметров объекта. Основные подходы включают:

Адаптивная идентификация: Методы, такие как адаптивный параметрический наблюдатель, позволяют отслеживать изменения параметров объекта в реальном времени. Например, Yakovis и Strongin (2021) предложили адаптивную систему идентификации, которая минимизирует влияние внешних помех за счет использования оператора интегральной модуляции [7, 8].

Метод интегральной модуляции: этот метод использует финитные функции для идентификации параметров объекта и обеспечивает более высокую точность по сравнению с классическим анализом, основанном на преобразовании Фурье, так как ядро интегральной модуляции аналогично функциям базисных функций вейвлет-преобразования, что позволяет динамически локализовать во временной области [9, 10, 11].

Машинное обучение: современные методы, такие как нейронные сети и глубокое обучение, применяются для моделирования сложных нелинейных систем [4, 5].

Особенностью идентификации нестационарных технологических процессов с переменными параметрами (например, изменение слоя покрытия во вращающихся печах) являются:

- Разложение переменных параметров по базисным функциям (например, полиномы Лагерра или Чебышева) для представления переменных параметров [4, 8, 11, 12];
- Использование градиентных методов наискорейшего спуска для минимизации ошибки идентификации [1; 2; 19].
- Преимущества современных методов. Современные методы идентификации имеют несколько ключевых преимуществ:
- Высокая точность: адаптивные модели и метод интегральной модуляции обеспечивают точность оценки параметров даже при значительном уровне шума.
- Устойчивость к шумам: за счет выбора интервала существования ядра оператора интегрирования можно эффективно фильтровать сигналы от внешних помех [15, 17].
- Адаптивность: адаптивные системы могут работать без отключения регулятора, что особенно важно для критически важных систем [9, 10, 13, 14, 16].

Эффективность систем идентификации и ее количественные и качественные характеристики остаются фундаментальными проблемами теории систем. Современные подходы, такие как адаптивные модели, метод интегральной модуляции и машинное обучение, позволяют решать задачи идентификации даже для сложных нестационарных систем. Эти методы находят широкое применение в управлении технологическими процессами, робототехнике и системах автоматического регулирования.

Особую сложность представляет идентификация динамических систем с переменными параметрами, что характерно для многих технологических процессов, таких как старение катализаторов в химической технологии, износ оборудования или изменение условий работы. Для таких систем необходимы методы текущей идентификации, позволяющие реструктурировать параметры регуляторов в режиме нормальной работы. В данной работе предлагается адаптивный параметрический метод идентификации на основе оператора интегральной модуляции, который минимизирует влияние внешних помех и обеспечивает высокую точность оценки параметров.

Методы исследования

Характеристика и идентификация систем являются фундаментальными проблемами теории систем [1]. Проблема характеристики связана с математическим представлением системы; модель системы выражается как оператор $\boldsymbol{F}$, преобразующий из входного пространства X в выходное пространство Y, и цель состоит в том, чтобы охарактеризовать класс $\mathfrak{M}$, к которому F принадлежит.

Учитывая класс $\mathfrak{M}$ и тот факт, что $F \in \mathfrak{M}$ проблема идентификации заключается в определении класса $\ddot{\mathfrak{M}}$ с $\mathfrak{M}$ и элемент $\ddot{\mathfrak{M}} \in \mathfrak{M}$, так что $\hat{F} \in$ приближает F в некотором желаемом смысле.

Рассмотрим сепарабельное банаховое пространство [2] , то есть множества, в которых существует счётное множество элементов $\{x_1, x_2 \dots x_n\}$, которое плотно в X найдется элемент x из множества, такой элемент $\|x - x_k\| < \varepsilon$. Это означает, что, пространство C[a, b] непрерывных на отрезке [a, b] функций $f(x)$ с нормой $\|f\| = \underbrace{max}_{a \le x \le b} |f(x)|$, где максимум определяется на отрезке $x \in [a, b]$ пространства $L_p[a, b], p \ge 1$, состоящего из функций интегрируемых в -й степени по Лебегу [3] , с нормой

$$\|f\| = \left\langle_a^b |f(x)|^p dx\right\rangle^{1/p} \quad (1)$$

Выбор класса идентификации моделей $\mathfrak{M}$, а также конкретный метод, используемый для определения F, зависит от множества факторов $\hat{F}$, которые связаны с желаемой точностью, а также с аналитической доступностью.

К ним относятся адекватность модели $\hat{F}$ для представления F, ее простота, легкость, с которой можно определить, насколько легко его можно расширить.

I. Идентификация динамических систем

Проблема распознавания образов является типичным примером идентификации статических систем [4,5]. Компакты $x_i \subset R^n, (i = 1,2..n)$ представляют собой отображения x_i в элементы y_j, $\subset$ Rm $(j = 1,2,..m)$ в выходное пространство с помощью функции F_o. Элементы x_i, обозначают набор элементов вектора, соответствующие классу y_j,. В динамических системах, оператор $\boldsymbol{F_o}$, определяющий данный объект неявно определяется парами времени $\{x(t), y(t), t\} \in [0, T]$ – входными и выходными сигналами функции $\boldsymbol{F_0}$. В обоих случаях цель состоит в том, чтобы определить $\boldsymbol{F_0}$ так, чтобы

$$\|y - \hat{y}\| = \|F_0(x) - F_m(x)\| \le \varepsilon\,, \;\; x \,\epsilon\, \mathcal{X} \quad (2)$$

для некоторого желаемого $\varepsilon > 0$ и подходящей нормы (обозначенной $\|\cdot\|$ в выходном пространстве (l), $F_m\,(\,x\,) = \hat{y}_m$ обозначает, что выход идентификационной модели и, следовательно, $y - \hat{y}_m \triangleq e$ — ошибка между выходным сигналами модели $\hat{y}_m$ и объекта y.

II. Адаптивная система идентификации

Объект F с заданной парой сигналов ввода-вывода $\{x(t_k), y_p(t_k)\}$. Состояние эталонной модели M также определяется ее парой сигналов входа-выхода $\{r\,(\,t\,), y_m\,(\,t_k\,)\}$ где r: N —R ограниченная функция.

Выход $\{y_{mж}(t_k)\}$ является желаемым сигналом параметризованной модели объекта. Цель состоит в том, чтобы при заданных входных и выходных сигналах $x(t_k)$ и $y_p(t_{k)}$ для всех $t_k \ge t_0$ параметры идентификационной модели объекта так, что $\lim_{t\to\infty}|y_p(t) - y_m(t)| \le \varepsilon$ для некоторой заданной константы $\varepsilon \le 0$.

Как описано ранее, выбор модели идентификации (т.е. ее параметризация) и метод корректировки ее параметров на основе ошибки идентификации e(t) составляют две основные части проблемы идентификации. Определение структуры модели идентификации и настройка его параметров для минимизации погрешности между выходом объекта и желаемым выходом модели объекта представляют собой соответствующие части задачи идентификации и управления.

Структура идентификатора может быть реализована в виде динамической эталонной модели, или в виде параметрической модели [6,7,8]. При этом для оценки неизвестных параметров нестационарного объекта на основе уравнений идентификации можно реализовать с помощью алгебраических методов [9] или с применением адаптивных алгоритмов [10].

III. Синтез алгоритмов идентификации стационарного динамического объекта с параметрическим наблюдателем

Пусть объект управления описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i[\tilde{y}(t)D^{(i)}] = \sum_{j=0}^{m} b_j[x(t)D^{(j)}]\,,\; a_0 = 1 \quad (3)$$

a_i и b_j –параметры объекта; x(t), y(t)- контролируемые входной и выходной сигналы объекта.
где: $\{x(t), y(t)\} \in B(G)$- входной и выходной сигналы объекта;
Di , Dj - операторы дифференцирования, действующие из пространства непрерывных функций $B'(G)$ в пространстве $Bp(\bar{G})$,$|\alpha|<p$; $\tilde{Y}(t) \epsilon B(\bar{G})$,
($\bar{G}$ - замыкание множества) G [t_0,-T] с нормой:
$||X||p = \max(\max|x(t)|, \max|x'(t)| \dots \max|x^{p}(t)|)$;
$||Y||p = \max(\max|y(t)|, \max|y'(t)| \dots \max|y^{p}(t)|)$.

Представим входной и выходной сигналы через оператор интегральной модуляции Φ_t [2, 3, 4, 5]:

$$\left.\begin{aligned} \Phi_t\{D^i x(t)\} = \int_{\tau=t_0}^{\tau=T} D^i x(t)\varphi(t,\tau)\,d\tau \\ \Phi_t\{D^j \tilde{y}(t)\} = \int_{\tau=t_0}^{\tau=T} D^j y(t)\varphi(t,\tau)\,d\tau \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

где: i=0,1, 2…, n; j=0, 1, 2…, m.

Как показывает практика, для определения параметров a_i и b_j оператора $\boldsymbol{F}$ в интервале $\tau \in [t_0 - T]$ и на основе сигналов $x(t)$ и $\tilde{y}(t)$ эффективным является метод интегральной модуляции (ИМ) [4-8]. Суть метода ИМ заключается в следующем: преобразуем выражение- (3) с помощью линейного оператора Φ_t. В таком случае, учитывая линейность оператора Φ_t, будем иметь:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i\,\Phi_t\left\{D^i\ y(\tilde{\imath})\right\} = \sum_{j=0}^{m} b_j\,\Phi_t\{D^{(j)}x(\tau)\} \tag{5}$$

где: $\Phi_t(\cdot)$ - линейный оператор модуляции, действующий над функциями $x(t,\tau)$, $y(t,\tau)$, при фиксированном значении аргумента τ. Ядро интегрального выражения (5) $\varphi_t\delta(t-\tau) \in B(G)$ является модулирующей функцией. Наложим на функцию $\phi_t\delta\,(t-\tau)$ следующее требование: пусть модулирующая функция $\varphi^{(i)}(t,\tau)$ и ряд ее обобщенных производных $\varphi^{(i)}(t,\tau)$ включительно до порядка n непрерывны в квадранте; $\tilde{y}(t)\epsilon P(t_0,\ t_0\ -T)$ и удовлетворяют условию:

$$\partial^i\,\varphi(t,\tilde{\imath}) = \begin{cases} \varphi^i\ \ (t,\tilde{\imath}) \text{ при } t_0 - T \le \tau < t_0 \\ 0 \text{ при } t_0\ \le \tau \le t_0\ -T \end{cases} \tag{6}$$

Значит эти функции из класса финитных, носители которых принадлежат интервалу (t_0-T, t_0), то есть $\mathrm{supp}[\varphi(t), (t-T,\tau)]. \in P(t_0\text{-T},\ t_0)$. Совокупность функционалов, входящих в выражение, можно рассматривать как регулярные обобщенные функции в пространстве основных финитных функций $\varphi^{(i)}(t,\tau) \in P$, для которых операция дифференцирования совпадает с операцией дифференцирования обычных функций [9].

$$(D^i\tilde{y},\varphi) = (-1)^i\left(\tilde{y}, D^i\,\varphi\right),\ \ \varphi \in \Phi \tag{7}$$

С учетом этого и условия (6) проинтегрируем выражение (5) по частям, рассматривая t как параметр, а τ как аргумент базисных функций $\varphi\,(t,\tau)$ до тех пор, пока производные от входных и выходных $\{x^i(t), \tilde{y}^j(t)\}$ сигналов не будут иметь степень нулевого порядка

$$\sum_{i=0}^{n}\int_{\tilde{\imath}=t_0-T}^{\tilde{\imath}=t_0} a_i\tilde{y}(\tau)[D_\tau^i\varphi(t,\tilde{\imath})]d\tilde{\imath} = \sum_{j=0}^{m}\int_{\tilde{\imath}=t_0-T}^{\tilde{\imath}=t_0} b_j x(\tau)[D_i^j\varphi(t,\tilde{\imath})]d\tilde{\imath} \tag{8}$$

Введем обозначения:

$$\tilde{C}_{i-1}(t) = \frac{d\tilde{C}_i}{dt} = \int_{t_0-T}^{t_0}\varphi^{(i-1)}\,(t,\tau)\tilde{y}(\tau)d\tau;$$

$$U_j(t) = \Phi[x] =<\varphi^{(j)}x(t)>= \int_{\tau=t_0-T}^{\tau=t_0} x(\tau)D_\tau^i\,d\tau \tag{9}$$

Можно показать, используя правило Лейбница / 79/, что

$$\tilde{C}_{i-1}(t) = \frac{d\tilde{C}_i}{dt} = \int_{t_{0-T}}^{t_0} \varphi^{(i-1)}(t,\tau)\tilde{y}(\tau)dt \quad (10)$$

аналогичное соотношение соблюдается и для функции $U_j(t)$

*Утверждение***:** Оператор Φ, отображающий в пространство P непрерывных функций {x(t), $\tilde{y}(t)$} с нормой $||\tilde{y}|| = \max_{0\le t\le 1}|\tilde{y}(t)|$, $||x||,\|y\| \in P$ пространстве P, T [0,1] вполне непрерывен. Для доказательства этого утверждения определим норму оператора следующим образом:

$$\|\Phi\tilde{y}\| = \|C\| = \max\left\{\max_{0\le t\le 1}|C_0(t)|, \dots, \max_{0\le t\le 1}\left|C_0^K(t)\right|\right\} =$$

$$= \max\{\max_{0\le t\le 1}\left|\int_0^1 \tilde{y}(\tau)\varphi_M(t,\tau)d\tau\right| \dots \max_{0\le t\le 1}\left|\int_0^1 \tilde{y}(\tau)\varphi^{(K)}(t,\tau)d\tau\right|\}$$

$$\le \max_{\tau}\int_0^t|\varphi(t,\tau)|\,d\tau * \max_{0\le t\le 1}\int_0^1\varphi^{(k)}(t,\tau)d\tau * |\tilde{y}(\tau)| =$$

$$\max_{0\le t\le 1}\left\{\max_{0\le t\le 1}\int_0^t\left|\varphi^{(k)}(t,\tau)\right|d\tilde{\tau}\right\}\|Y\| \quad (11)$$

Следовательно,

$$\|\Phi\| \le \max\{\max_{0\le t\le 1}\int_0^1|\varphi(t,\tau)d\tau \dots \max \quad (12)$$

Пусть Y(t) - ограниченное множество функций из P [0,1]. Тогда, функция $C_i(t) = \max_{\tau}\left|\int_0^t\varphi^{(i)}y(t,\tau)d\tau\right|$ также равномерно ограничена. Действительно, если $\max_{\tau}\left|\varphi^i(t,\tau)\right| = M$, то $|C_i(t)| \le M * d$.

Далее, функции $C_i(t)$ равно степенно непрерывны. В силу непрерывности ядра $\varphi^{(i)}(t,\tau)$, для любого можно найти такое, что

$$\left|\varphi^{(i)}(t_{1,}\tau) - \varphi^{(i)}(t_{2,}\tau)\right| < \delta;\ \delta < |t_1 - t_2| \in [0,1],$$

но тогда

$$|C_i(t_1) - C_i(t_2)| < \int_0^1\left|\varphi^{(i)}(t_{1,}\tau) - \varphi^{(i)}(t_{2,}\tau)\right|\left|\tilde{Y}(\tau)\right|d\tau < \delta\ , \quad (13)$$

что означает равно степенность рассматриваемых функций. Следовало, из равномерной ограниченности и равно степенности функций $\tilde{C}_i(t)$ следует ограниченность и непрерывность оператора интегральной модуляции Φ. Используя рассматриваемый метод, можно исходное дифференциальное уравнение (8) представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n a_i C_i(t) - \sum_{j=1}^m b_j U_j(t) + U_0(t) \quad (14)$$

или в матричной форме

$$\tilde{\mathbf{C}}(n)q = \boldsymbol{U}_0(n) \quad (15)$$

где $\tilde{C}(n)$- матрица известных коэффициентов размера (n+m+1) × (n+m+1) с элементами:

$$\tilde{\boldsymbol{C}}\{n\} = \begin{vmatrix} \tilde{C}_0(0) * \tilde{C}_1(0) \dots & \tilde{C}_n(0)\tilde{U}_1(0) & \cdots & \tilde{U}_m(0) \\ \tilde{C}_0(1) * \tilde{C}_1(1) \dots & \tilde{C}_n(1)\tilde{U}_1(1) & \cdots & \tilde{U}_m(1) \\ \vdots \quad\quad \vdots & \vdots \quad \vdots & & \vdots \\ \tilde{C}_0(n) * \tilde{C}_0(n) \quad \cdots & \tilde{C}_n(n)\tilde{U}_1(n) & \cdots & \tilde{U}_m(n) \end{vmatrix}$$

где: $q = \{a_i \text{ и } b_j\}$– вектор неизвестных параметров стационарного объекта;
x(t), y(t)- контролируемые входной и выходной сигналы объекта.

Результаты исследований рассматриваемого параметрического метода идентификации приведены на рисунке 1.

IV. Синтез адаптивных алгоритмов идентификации с параметрическим наблюдателем (НП) для нестационарного объекта

Теперь рассмотрим применение данного подхода применительно к объекту с переменными параметрами

$$\sum_{i=0}^{n}\int_{\tilde{\iota}=t_0-T}^{\tilde{\iota}=t_0} a_i\tilde{y}(\tau)[D_\tau^i\varphi(t,\tilde{\iota})]d\tilde{\iota}=\sum_{j=0}^{m}\int_{\tilde{\iota}=t_0-T}^{\tilde{\iota}=t_0} b_j x(\tau)[D_i^j\varphi(t,\tilde{\iota})]d\tilde{\iota} \quad (16)$$

Представим переменные параметры: $a_i(t), b_j(t)$ уравнения (16) в виде разложения на интервале $t_\mu\in(t_0-T,t_0)$.

$$a_{i0}(t)=\sum_{k=0}^{N} q_{ik}\, f_k(t_\mu)\,;\, b_{j0}=\sum_{k=0}^{M} l_{ik} f_k\,(t_\mu).\ i=\overline{1,2,,n};\ j=\overline{0,1,2,..m} \quad (17)$$

где $f_k(t_\mu)$ – базис функции, в качестве которых могут быть использованы функции: Лагерра, Лежандра, Каутца, Якоби, Чебышева, Тейлора [10].

С учётом разложения (17) выражение (16) можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=0}^{N} q\left[\tilde{y}^i(t)f_{ki}(t)\right]+y(t)=\sum_{j=0}^{m}\sum_{k=0}^{M} l_{jk}\left[x^j(t)f_{kj}(t)\right]. \quad (18)$$

Применив оператор интегральной модуляции Ф к уравнению (18), преобразуем последнее к виду:

$$C_0(t)+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=0}^{N} q_{ik}\, C_{ik}(t)=\sum_{j=0}^{m}\sum_{k=0}^{M} l_{jk}U_{jk}\,(t), \quad (19)$$

где коэффициенты $C_{ik}(t)$, $U_{jk}(t)$ определяются из условий:

$$\left.\begin{aligned} C_{ik}(t)&=\int_{t_0-T}^{t_0}\tilde{y}(\tau)\,[f_k(\tau)\varphi(\tau)]^i d\tau\\ U_{jk}(t)&=\int_{t_0-T}^{t_0}x(\tau)\,[f_k(\tau)\varphi(\tau)]^j d\tau\end{aligned}\right\} \quad (20)$$

Введем в рассмотрение функционал вида:

$$\mathcal{F}=\overline{e^2}(t)=E\left[\sum_{i-1}^{n}\sum_{k=0}^{M} q_{ik}\ C_{ik}(t)-\sum_{j-1}^{m}\sum_{k=0}^{M} l_{jk}\ U_{jk}(t)\ +C_0(t)\right]^2 \quad (21)$$

Для минимизации функционала используем градиентный метод наискорейшего спуска. Определим частные производные функционала $\mathcal{F}$ по параметрам q_{ik}, l_{jk} :

$\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial(q_{ik},l_{jk})}=\overline{2e\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=0}^{N}\frac{\partial e}{\partial(q_{ik})}}+\overline{2e\sum_{j=0}^{m}\sum_{k=0}^{N}\frac{\partial e}{\partial(l_{jk})}}$, “ – ”знак операции усреднения, где частные производные по параметрам связаны с координатами $C_{ik}(t)$, $U_{jk}(t)$ следующими соотношениями:

$$\frac{\partial e}{\partial(q_{ik})}=C_{ik}(t),\ \frac{\partial e}{\partial(l_{jk})}=U_{jk}(t) \quad (22)$$

Найдём условия, при которых минимизируемый функционал уменьшается вдоль траектории, заданной уравнением спуска:

$$\frac{\partial(q_{ik},l_{jk})}{dt}\quad-\Gamma(t)\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial(q_{ik},l_{jk})}\ ; \quad (23)$$

Вычислим полную функционала $\mathcal{F}$ по времени:

$$\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial t}=\sum_{\substack{i=1\\ j=0}}^{n,N}\sum_{k=1}^{m,M}\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial(q_{ik},l_{jk})}+\frac{\partial\mathcal{F}}{\partial t} \quad (24)$$

Введем допущение о стационарности экстремальной точки функционала во времени. Тогда выражение будет иметь максимальное значение, когда составляющие вектора $\partial\mathcal{F}/\,\partial(q_{ik},l_{jk})$ коллинеарны соответственно векторам оцениваемых параметров q_{ik}, l_{jk} ; с учетом этого получим условие настройки коэффициентов $\widehat{q_{ik}},\widehat{l_{jk}}$ НП.

$$\frac{\partial\widehat{q_{ik}}}{\partial t} = \overline{-\gamma_{ik} e(t) C_{ik}(t)}, \quad \frac{\partial\widehat{l_{jk}}}{\partial t} = \overline{-\gamma_{jk} e(t) C_{jk}(t)}, \tag{25}$$
$$i = \overline{1,2,\ldots,n};\ \gamma = 0,1,2,\ldots m; k = \overline{0.1,\ldots,N,(M)}$$

Для технической реализации системы идентификации с НП требуется в общем случае (n+m+1) x(n+m+1) переменных коэффициентов, используемых в качестве настраиваемых параметров модели. Систему уравнений упростим для того случая, когда процесс квазистационарных в интервале наблюдения. Тогда переменные параметры объекта можно представить в виде:

$$\left.\begin{aligned} a_{i0}(t) = a_i + \Delta a_i(t) \\ b_{j0}(t) = b_j + \Delta b_j(t) \end{aligned}\right\} \quad , \quad t \in T \tag{26}$$

где $\Delta a_i(t), \Delta b_j(t)$ – величины достаточно высокого порядка малости. С учетом этого запишем уравнение ошибки модели в пространстве координатных функций $(C_i(t),\ U_i(t))$:

$$\mathcal{F} = \overline{e^2}(t) = E\left\{\left[\sum_{i=1}^{n} \hat{a}_i C_i(t) + \Delta Z_\alpha(t)\right] - \left[\sum_{j=0}^{m} b_j U_j(t) + \Delta\mu_\beta(t)\right]\right\}^2 \tag{27}$$

Пренебрегая членами более высокого порядка,

$$\left.\begin{aligned} \Delta Z_\alpha(t) &= \int_{t_0-T}^{t_0} \Delta a_{i0}(\tau) y^{(i)}(\tau)\varphi(t,T)d\tau \\ &\vdots \\ \Delta\mu_\beta(t) &= \int_{t_0-T}^{t_0} \Delta a_{j0}(\tau) x^{(j)}(\tau)\varphi(t,T)d\tau \end{aligned}\right\} \tag{28}$$

Получим функционал вида:

$$\mathcal{F} = \overline{e^2}(t) = E\left[\sum_{i=1}^{n} \hat{a}_i C_i(t) + C_0(t) - \sum_{j=0}^{m} \hat{b}_i U_i(t)\right]^2 \tag{29}$$

Можно показать [11,12], что оценки параметров $(a_{i,} b_j)$, доставляющих минимум выражению (28), будут определяться из системы уравнений:

$$\frac{d\hat{a}_i}{dt} = -\gamma_i e(t) C_i(t) i = \overline{1,2,\ldots,n};$$
$$\frac{d\beta}{dt} = -\gamma_j e(t) U_j(t) \quad j = \overline{0,1,2,\ldots,m}; \tag{30}$$

Блок-схема системы идентификации (СИ) с адаптивным наблюдателем параметров приведена на рисунке 2, где ФКФ1, ФКФ2 формирователи координатных функций -$C_i(t), U_j(t)$. Результаты исследования, приведённые в среде Matlab/Simulink, показали работоспособность и эффективность последнего при оценке текущего параметров объекта, описываемого уравнением (16).

Результаты и обсуждения

Моделирование системы идентификации осуществлялось при различных значениях коэффициента зашумлённости полезного выходного сигнала объекта$K_\delta = \delta_n^2/\delta_c{}^2$ (здесь $\delta_n^2, \delta_c{}^2$ - соответственно уровень дисперсий помехи и полезного сигнала) и следующих значений параметров модели: $a_2 = 2$,$a_1 = 1.2$,$b_0 = 1.4$. Осциллограммы работы адаптированного НП, соответствующие трем различным вариантам эксперимента представлены на рисунке 1.

Относительная погрешность (где $\hat{q} = \left(\widehat{a_{2,}}\widehat{a_{1,}}\ \widehat{k_{0,}}\right)$), $\widehat{\bar{q}} \triangleq \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \hat{q}_i[n]$

n-количество точек съема измерений значений вектора $\hat{q}$), составило соответственно при $K_{\delta^2} = 1 \div 1.3$; $\|\delta_q\| = 5 \div 8\%$, при $K_{\delta^2} = 2$, $\|\delta_q\| = 10 \div 1.3$ и при $K_{\delta^2} = 0{,}15 \div 0{,}2$

$$\|\delta_q\| \ = 3\ \ 4\% \quad \|\delta_q\| = \frac{\|\bar{\hat{q}} - q\|}{\|q\|_2} \cdot 100\%,$$

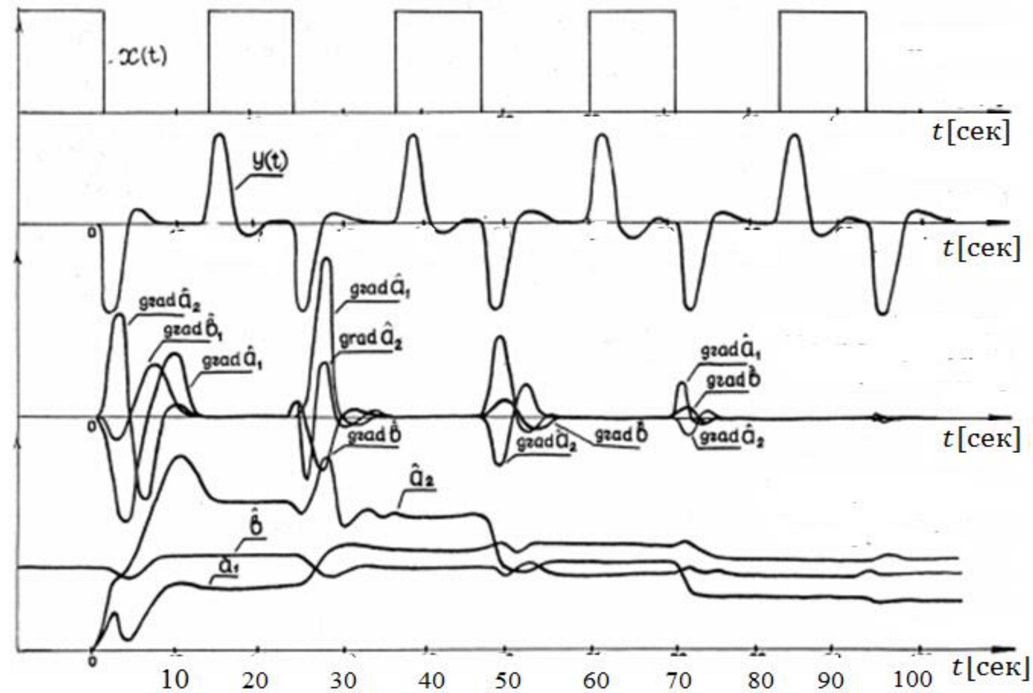

Рисунок 1 – Адаптивная система идентификации параметров стационарного объекта второго порядка

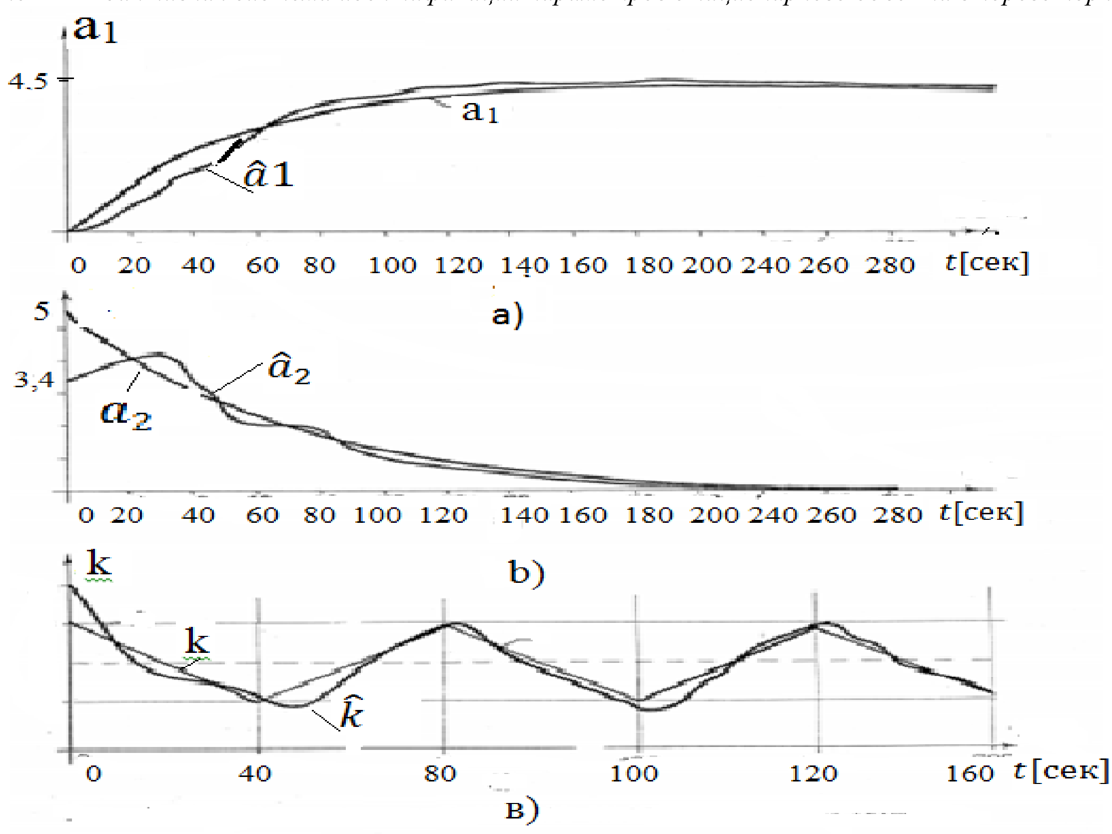

Рисунок 2 – Адаптивная система идентификации динамического объекта с переменными параметрами

Настройка коэффициентов адаптированного наблюдения параметров производилась при подаче на вход объекта идентификации сигнала прямоугольной формы при различных начальных значениях коэффициентов НП. Из осциллограммы, представленной на рисунке 2в, видно, что система идентификации сохраняет устойчивость и обеспечивает сходимость даже при нулевых начальных значениях коэффициентов НП.

Рассматриваемая система идентификации с адаптированным наблюдателем параметров использовалась для идентификации нестационарных параметров $a_2(t), a_1(t), b_0(t)$ объекта, описываемого дифференциальным уравнением вида (2.1), где параметры идентифицируемого объекта изменились по следующим законам:

$$a_2(t)4.5[1-\exp(-t/50)]; a_2(t) = 5.2\exp(-0.01t); b_0(t) = 2.6 \pm \int_0^T 0.06dt.$$

Результаты моделирования представлены на рисунке 2 (а, б, и в). Эксперимент подтвердил работоспособность последнего при изменяемых параметрах объекта в широких пределах:

$$a_1 = 0 \div 4.5; a_2(t) = 5.4 \div 3.6; b_0 = 5 \div 1.4;$$

Следует отметить, что при интенсивных изменениях параметров объекта на выходе НП могут возникать большие рассогласования, которые не могут своевременно уменьшить контур самонастройки НП из-за наличия в системе идентификации собственной постоянной времени, определяемой следующей совокупностью: интеграторами исполнительных устройств и т.д. Причем в целях получения в некоторых случаях оптимальной системы идентификации (в смысле быстродействия СИ и точности получаемых результатов) необходимо применить принципы адаптации не только к устройству наблюдения параметров, но и к остальным звеньям, входящим в состав СИ.

Заключение

Предложенный адаптивный параметрический метод идентификации на основе оператора интегральной модуляции позволяет эффективно оценивать текущие значения параметров динамических объектов с постоянными и переменными параметрами. Разработанный алгоритм обеспечивает высокую точность оценки в условиях воздействия внешних помех и может быть использован для расчёта параметров стандартных регуляторов в режиме рабочей эксплуатации объектов управления.

Рецензент: Гуломсафдаров А.Г. – к.т.н., и.о. доцента Технологического университета Таджикистана.

Литература

1. Построение системы управления объекта с запаздыванием с применением параметрического идентификатора / У. Х. Джалолов, Н. И. Юнусов, Р. М. Бандишоева [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 1(49). – С. 18-22. – EDN GTQZWQ.
2. Юнусов Н.И., Джалолов У.Х., Зиёев Ш.Ш., Холов Ш.Ё., и др. Устройство для дополнительного охлаждения двигателей внутреннего сгорания / Н.И. Юнусов, У.Х. Джалолов, Ш.Ш. Зиёев, Ш.Ё. Холов и др. // Патент TJ 1447, заявка №1801183 от 01.03.2018, зарег. 20.06.2018.
3. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления: Учебн. пособие. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. - 211 с.
4. Советов Б.Я., Цехановский В.В., Чертовский В.Д. Интеллектуальные системы и технологии. Москва: ИЦ «Академия», 2013, 320с.
5. Бозоров, Ш. А. Аналитические методы расчета влияния температурного режима и производительности солнечных опреснительных установок / Ш. А. Бозоров, А. С. Джафаров // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 4(56). – С. 22-30. – EDN MDCTQV.
6. Nils J., Nilsson N.J. Introduction to Machine learning – Robotics Laboratory Department of Computer Science. Stanford: Stanford University. 1998, 188p.
7. Yakovis, L.M. Adaptive Identification of Control Objects in Systems with Standard Controllers / L.M. Yakovis, P.Ya. Strongin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1864. – № 1. – P. 012110. DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012110.
8. Yakubov, M. Methods for adaptive control of objects with variable parameters / M. Yakubov, G. Jamalova // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264. – P. 01049. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401049.
9. L.M. Yakovis and P.Ya. Strongin 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1864.
10. Джалолов У.Х., Набиев С.А., Тавказаков М.Б. Адаптивная система для стабилизации скорости перемещения штучных изделий в вибрационно-загрузочном устройстве // Тез.докл. XП Республикан. научно-технич. конф. по проблемам строительства в машиностроении.- Нальчик. I984. - с.25-27.
11. Джалолов У.Х. Параметрическая идентификация нестационарных динамических объектов. Тезисы докладов IX Всесоюзного совещания по проблемам управления. Ереван 1983. - с.72-73.
12. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2008 – 448 с.

13. Махмудович, Г.Р. О равномерной сходимости ряда Фурье по системе полиномов, порожденной системой полиномов лагерра / Г.Р. Махмудович // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 416-423.

14. М.Ю Сидляр. Разложение по собственным функциям оператора Лежандра на мнимой оси / Сидляр М.Ю // Вестник российских университетов. Математика. – 2005. – Т. 10. – № 1. – С. 53-54.

15. Барвинский, Д.А. Применение метода градиентного спуска в решении задач оптимизации / Д.А. Барвинский, Т.А. Минеева // ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ. – 2021. – Т. 74. – С. 61-66. DOI: 10.18411/lj-06-2021-56.

16. Викторович С.С. Решение задачи нелинейной параметрической идентификации стохастических объектов с использованием критерия минимума вероятности ошибки оценивания / С.С. Викторович, К.П. Александрович // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 3. – С. 5-12.

17. Галоян, Л. О сходимости рядов Фурье по классическим системам / Л. Галоян, L. Galoyan, М. Григорян и др. // Математический сборник. – 2015. – Т. 206. – С. 55-94. DOI: 10.4213/sm8424.

18. Ирсунович Ц.Р. Условия сходимости ряда Фурье при разложении сигнала по новым системам базисных функций / Ц.Р. Ирсунович // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2011. – № 2. – С. 123-131.

19. Нечеткое управление процессами в системе охлаждения ддвс с дополнительным устройством / Н. И. Юнусов, У. Х. Джалолов, Ш. Ш. Зиеев, У. А. Турсунбадалов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 3(47). – С. 38-43. – EDN HXMAYU.

МАЪЛУМОТ ОИД БА МУАЛЛИФОН -СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ҷалолов Убайдулло Ҳабибуллоевич	Джалолов Убайдулло Хабибуллоевич	Jalolov Ubaydullo Habibulloevich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of technical sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: Jalolov@gmail.com		

TJ	RU	EN
Бандишоева Рисолат Мирзошоевна	Бандишоева Рисолат Мирзошоевна	Bandishoeva Risolat Mirzoshoevna
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of technical sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: risolatbm@gmail.com		

TJ	RU	EN
Бадалова Мамлакат бдухайровна	Бадалова Мамлакат бдухайровна	Badalova Mamlakat Abdukhayrovna
н.и.т., и.в. дотсент	к.т.н., и.о. доцента	Candidate of technical sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: bmamlakat@mail.ru		

TJ	RU	EN
Холов Шавқат Ёрович	Холов Шавкат Ёрович	Kholov Shavkat Yorovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of technical sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: sh.kholov88@gmail.com		