ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Г. С. Володченко

Харьков

Для широкого класса нестационарных линейных объектов управления, структура которых представляет собой систему параллельных фильтров.

$$W_0(p)=\sum_{i=1}^{m}\frac{k_{0i}}{T_{0i}p+1}, \qquad (1)$$

математическая модель системы идентификации его параметров r_μ ($\mu=1, 2, \ldots, s$) на интервале $nT<t<(n+1)T$ при интегральном критерии качества может быть описана системой интегральных уравнений

$$\left[\frac{\partial I}{\partial K_{\mu_l}}\right]_n=\frac{2}{T}\int_{nT}^{(n+1)T} L^{-1}\left[\sum_{i=1}^{m}\frac{k_{0i}}{T_{0i}p+1}-\sum_{i=1}^{m}\frac{k_{\mu i}}{T_{\mu i}p+1}\right]_n x(t)\times$$

$$\times L^{-1}\left[\frac{1}{T_{\mu i}p+1}\right]x(t)\,dt,$$

$$\left[\frac{\partial I}{\partial T_{\mu i}}\right]_n=-\frac{2}{T}\int_{nT}^{(n+1)T} L^{-1}\left[\sum_{i=1}^{m}\frac{k_{0i}}{T_{0i}p+1}-\sum_{i=1}^{m}\frac{k_{\mu i}}{T_{\mu i}p+1}\right]_n x(t)\times$$

$$\times L^{-1}\left[\frac{k_{\mu i}p}{(T_{\mu i}p+1)^2}\right]_n x(t)\,dt, \qquad (2)$$

где I — минимизируемый функционал интегрального критерия качества;

$\sum_{i=1}^{m} \frac{k_{u_i}}{T_{u_i}p+1}$ — структура самонастраивающейся модели нестационарного объекта управления.

Математическое описание связи входного сигнала и реакций $\left[\frac{\partial I}{\partial r_\mu}\right]_n$ ($\mu=1, 2, \ldots, s$) на этот сигнал, в интервале времени $nT<t<(n+1)T$, для n-того цикла идентификации может быть с достаточной степенью точности выражено функциональным рядом Вольтерра-Винера

$$\left[\frac{\partial I}{\partial r_\mu}\right]_n = \sum_{\nu=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \ldots \int_0^{\infty} g_\nu(\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_\nu)\, x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) \ldots x(t-\tau_\nu) \times \times d\tau_1 d\tau_2 \ldots d\tau_\nu, \qquad (3)$$

сходимость которого для детерминированного и стохастических случаев доказана КУ и Вольфом в работе 2 (теорема 1÷4).

Здесь

$x(t)$ — функция времени, описывающая входной сигнал, а $\left[\frac{\partial I}{\partial r_\mu}\right]_n$ — минимизируемый функционал, представляющий собой реакции идентификаторов по μ-тому параметру для n-того цикла идентификации, описываемые функцией времени;

$g_\nu(\tau_1, \tau_2, \ldots \tau_\nu)$ — последовательность ядер Вольтерра-Винера нелинейных систем, которые с помощью ортогональных функций Лагерра могут быть представлены как реакции линейных систем.

Таким образом, нелинейная система идентификации (2) по каждому μ-тому параметру, в общем случае, может быть охарактеризована последовательностью ядер Вольтерра-Винера, где:

а) — ядро нулевого порядка g_0 равно постоянной;

б) — ядро первого порядка $g_1(\tau_1)$ является линейным ядром, или реакцией линейной системы на импульсное воздействие;

в) — ядро второго порядка $g_2(\tau_1, \tau_2)$ является квадратичным ядром;

г) — ядро γ-того порядка равно $g_\nu(\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_\nu)$.

Такое ортогональное разложение было предложено Винером для синтеза несепарабельных ядер нелинейных систем, которое в общем случае для ядра второго порядка требует бесконечного числа множителей [2].

Условимся, что все параметры системы идентификации (2), за исключением параметра $r\mu(\mu=1)$, соответствуют параметрам объекта управления. Тогда математическая модель системы идентификации по μ-тому ($\mu=1$) параметру для n-того цикла идентификации будет представлена в виде

$$\left[\frac{\partial I}{\partial k_{u_1}}\right]_n = \frac{2}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} L^{-1}\left[\frac{k_{0_1}}{T_{0_1}p+1} - \frac{k_{u_1}}{T_{u_1}p+1}\right]_n x(t) \times \qquad (4)$$

$$\times L^{-1}\left[\frac{1}{T_{u_1}p+1}\right]_n x(t)\, dt,$$

функциональная схема которой изображена на рис. 1. Приведем полученную систему идентификации к основной системе второго порядка и будем искать ее передаточную функцию методом Винера-Шетцена.

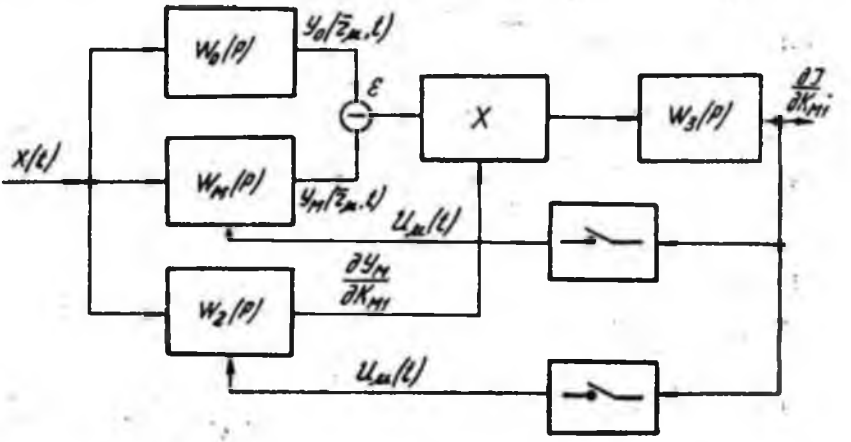


Рис. 1. Функциональная схема нелинейной системы идентичности параметра.

Обозначив

$$L^{-1}\left[\frac{k_{0_1}}{T_{0_1}p+1}-\frac{k_{m_1}}{T_{m_1}p+1}\right]=h_1(t);$$

$$L^{-1}\left[\frac{1}{T_{m_1}p+1}\right]=h_2(t); \qquad (5)$$

$$L^{-1}\left[\frac{k_m}{T_m p}\right]=h_3(t);$$

$$E=Z_1(t);$$

$$\frac{\partial y_m}{\partial k_{m_1}}=Z_2(t); \qquad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial k_{m_1}}=Y_m(t),$$

и выполнив структурные преобразования, для разомкнутого цикла, получим функциональную схему основной системы ядра второго порядка (рис. 2), где $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$ — импульсные переходные функции соответствующих линейных систем

$$W_1(p)=\frac{k_{0_1}}{T_{0_1}p+1}-\frac{k_{m_1}}{T_{m_1}p+1}, \qquad (7)$$

$$W_2(p)=\frac{1}{T_{m_1}p+1},$$

$$W_3(p)=\frac{k_m}{T_m p}.$$

Из рис. 1, 2 следует, что на линейную систему $W_1(p)$, имеющую импульсную переходную функцию $h_1(t)$, действует входной сигнал $x(t)$,

а выходным сигналом ее является $Z_1(t)$. На линейную систему $W_2(p)$ с импульсной переходной функцией $h_2(t)$ действует входной сигнал $x(t)$; выходным сигналом этой системы является $Z_2(t)$.

Произведение $Z_1(t) \cdot Z_2(t)$ поступает на вход линейной системы

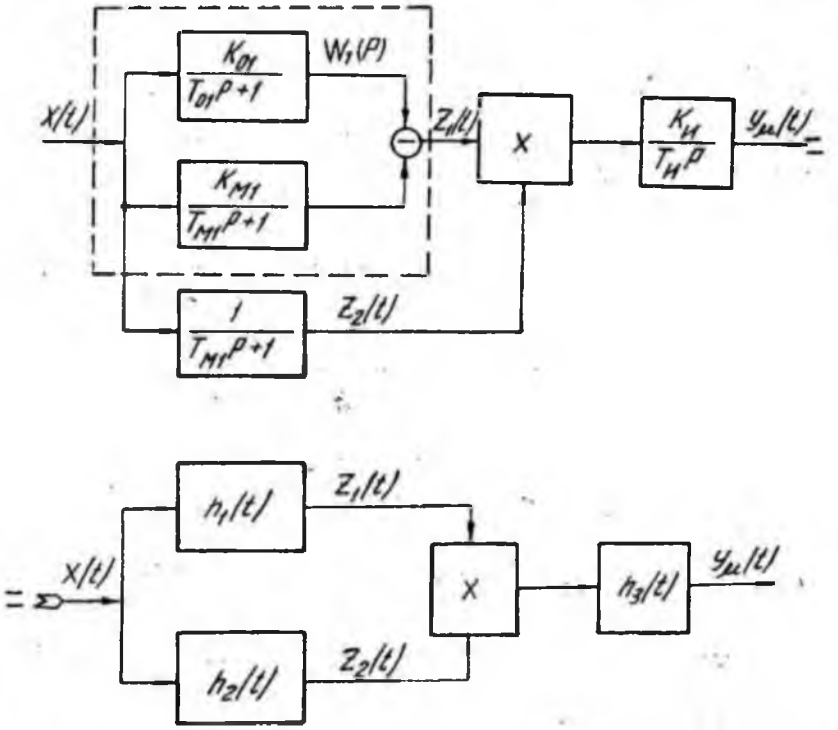


Рис. 2. Функциональная схема основной системы ядра второго порядка.

$W_3(p)$ с импульсной переходной функцией $h_3(t)$, выходным сигналом которой является $Y\mu(t)$, определяемый выражением

$$Y_\mu(t) = \int_0^\infty h_3(t)\, Z_1(t)\, Z_2(t)\, dt. \qquad (8)$$

Поскольку звенья $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ с импульсными переходными функциями $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, входящие в нелинейную систему рис. 1, 2 являются инерционными (7), реакции последних с учетом запаздывания можно представить в виде

$$Z_1(t-\sigma) = \int_0^\infty h_1(\sigma_1)\, x(t-\sigma-\sigma_1)\, d\sigma_1; \qquad (9)$$

$$Z_2(t-\sigma) = \int_0^\infty h_2(\sigma_2)\, x(t-\sigma-\sigma_2)\, d\sigma_2; \qquad (10)$$

$$Y_\mu(t) = \int_0^\infty h_3(\sigma)\, Z_1(t-\sigma)\, Z_2(t-\sigma)\, d\sigma. \qquad (11)$$

Подставляя значения реакций $Z_1(t-\sigma)$, $Z_2(t-\sigma)$ из (9), (10) в (11), получим

$$Y_\mu(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty h_3(\sigma)\, h_1(\sigma_1)\, h_2(\sigma_2)\, x(t-\sigma-\sigma_1)\, x(t-\sigma-\sigma_2)\, d\sigma\, d\sigma_1\, d\sigma_2, \quad (12)$$

где σ — параметр, учитывающий запаздывание системы.

Ввиду того, что математическая связь входного и выходного сигналов нелинейной системы, в общем случае, описывается функциональным рядом (3), приведем выражение (12) к форме функционального ряда Вольтерра-Винера.

Полагая в (12) $\sigma=\tau_1-\sigma_1=\tau_2-\sigma_2$, получим

$$Y_\mu(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty h_3(\sigma)\, h_1(\tau_1-\sigma)\, h_2(\tau_2-\sigma)\, x(t-\tau_1)\, x(t-\tau_2)\, d\sigma\, d\sigma_1\, d\sigma_2 =$$

$$= \int_0^\infty \int_0^\infty h(\tau_1, \tau_2)\, x(t-\tau_1)\, x(t-\tau_2)\, d\tau_1\, d\tau_2. \quad (13)$$

Полученное выражение представляет собой двумерный интеграл свертки нелинейной системы второго порядка, другими словами, свертку второго порядка в пространстве времени, где

$$h(\tau_1, \tau_2) = \int_0^\infty h_3(\sigma)\, h_1(\tau_1-\sigma)\, h_2(\tau_2-\sigma)\, d\sigma \quad (14)$$

является ядром основной системы второго порядка Винера-Шетцена. Решая интегральные уравнения свертки (13), (14) операторным методом, получим двумерное преобразование Лапласа ядра второго порядка

$$F(p_1, p_2) = \int_0^\infty \int_0^\infty h(\tau_1, \tau_2)\, e^{-(p_1\tau_1 + p_2\tau_2)}\, d\tau_1 d\tau_2. \quad (15)$$

Подставляя в выражение (15) значение ядра второго порядка из (14), имеем

$$F(p_1, p_2) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty h_3(\sigma)\, h_1(\tau_1-\sigma)\, h_2(\tau_2-\sigma)\, e^{-(p_1\tau_1 + p_2\tau_2)}\, d\sigma\, d\tau_1 d\tau_2. \quad (16)$$

Производя замену переменных $\tau_1-\sigma=\sigma_1$ и $\tau_2-\sigma=\sigma_2$, получим

$$F(p_1, p_2) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty h_1(\sigma_1)\, h_2(\sigma_2)\, h_3(\sigma)\, e^{-\sigma_1 p_1} e^{-\sigma_2 p_2} e^{-\sigma(p_1+p_2)}\, d\sigma\, d\sigma_1 d\sigma_2. \quad (17)$$

Полученное выражение представляет собой двумерное изображение Лапласа ядра второго порядка.

Применяя к полученному изображению теорему Джорджа о преобразовании ядра вида $h(t_1, t_2 \ldots, t_n)$, получим

$$F(p_1, p_2) = \int_0^\infty h_1(\sigma_1)\, e^{-\sigma_1 p_1}\, d\sigma_1 \int_0^\infty h_2(\sigma_2)\, e^{-\sigma_2 p_2}\, d\sigma_2 \int_0^\infty h_3(\sigma)\, e^{-\sigma(p_1+p_2)}\, d\sigma, \quad (18)$$

где с учетом выражений (7)

$$\int_0^{\infty} h_1(\sigma_1)\, e^{-\sigma_1 p_1}\, d\sigma_1 = W_0(p_1) - W_u(p_1),$$

$$\int_0^{\infty} h_2(\sigma_2)\, e^{-\sigma_2 p_2} d\sigma_2 = W_2(p_2), \qquad (19)$$

$$\int_0^{\infty} h_3(\sigma) e^{-\sigma(p_1+p_2)}\, d\sigma = W_3(p_1+p_2).$$

Решая интегральное уравнение свертки (18) с учетом (19), окончательно получим

$$F(p_1, p_2) = [W_0(p_1) - W_u(p_1)]\, W_2(p_2)\, W_3(p_1+p_2). \qquad (20)$$

Следовательно, передаточная функция основной системы второго порядка (рис. 2) представляет собой свертку в комплексной плоскости, соответствующую умножению передаточных W — функций аргумента p_1, аргумента p_2 и суммы аргументов p_1+p_2 линейных систем, описываемых выражениями (7).

Таким образом, передаточную функцию системы идентификации нестационарного объекта управления, по каждому μ-тому ($\mu=0, 1, \ldots, s$) параметру, для n-того цикла идентификации, следует рассматривать как решение интеграла свертки в комплексной плоскости от двумерного изображения Лапласа ядра второго порядка Винера-Шетцена.

Решая интеграл свертки в комплексной плоскости (20) с учетом выражений (7) и с помощью теоремы о вычетах [4], получим передаточную функцию эквивалентной линейной системы идентификации в виде

$$W_э(p) = \left[\frac{k_{э_1}}{\frac{T_{э_1}}{2} p + 1} - \frac{k_{u_1}}{\frac{T_{э_1}}{2} p + 1} \right] \cdot \frac{k_u}{T_u p}. \qquad (21)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. З. Цыпкин. Адаптация и обучение в автоматических системах. Изд-во «Наука», 1968.

2. И. Ку, А. А. Вольф. Применение функционалов Вольтерра-Винера для анализа нелинейных систем. Техническая кибернетика за рубежом, под ред. доктора технических наук В. В. Солодовникова. Изд-во «Машиностроение», 1968.

3. А. А. Волков, Г. С. Володченко. К вопросу аналитического конструирования адаптивных систем идентификации объектов управления с переменными параметрами. Сб. «Промышленная кибернетика». Изд-во АН УССР, вып. 4, 1969.

4. Б. В. Шабат. Введение в комплексный анализ. Изд-во «Наука», 1969.

К ВЫБОРУ АЛГОРИТМОВ НАХОЖДЕНИЯ МНОЖЕСТВА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ И ГЛАВНЫХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

А. Г. Евдокимов, Ю. Ю. Завизиступ, Г. Ф. Кривуля, Е. В. Трунов
Харьков

В предлагаемой работе рассмотрены алгоритмы нахождения множества фундаментальных циклов B^* и главных сечений Q^*, эквивалентных топологическим матрицам фундаментальных циклов $B_к$ и глав-