УДК 007.5.(075.8)

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИНОМОВ ВОЛЬТЕР-РА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ

д.т.н., проф. В.И. Капалин, Нгуен Кан Шон

Морские суда являются объектами управления со сложными динамическими свойствами. Методы расчета систем судовой автоматики, применяющие линейные модели, не позволяют учесть реальные нелинейные свойства таких объектов. В работе предложена теория моделирования систем судовой автоматики, основанная на применении полиномов Вольтерра, учитывающая нелинейные динамические свойства объектов управления.

Одним из направлений современной теории нелинейных систем управления является подход с использованием функциональных полиномов Вольтерра [1]. Этот подход, с одной стороны, может рассматриваться как обобщение классической теории управления, а с другой стороны, во многом преодолевает ограничения последней. В настоящей работе рассматривается применение указанного подхода для моделирования и идентификации систем автоматики морских судов.

Известно, что современные морские суда являются сложными динамическими объектами, динамические свойства которых существенно зависят от изменяющихся условий их эксплуатации. На динамические свойства судов существенным образом влияют водоизмещение, состояние корпуса судна, скорость и ряд других факторов. Важной характерной особенностью динамики здесь является ее нелинейный характер, наличие таких нелинейностей как зона нечувствительности, насыщение и т.д. Указанные обстоятельства существенно усложняют проблему моделирования трех основных систем судовой автоматики: авторулевых, успокоителей качки и систем управления поступательным движением судна [2].

Традиционные методы синтеза указанных систем основаны на применении линеаризации и методов линейной теории управления. Как следствие эффект от применения современных алгоритмов управления может оказаться не столь существенным. Это обстоятельство делает актуальной проблему разработки моделирования систем судовой автоматики с учетом их реальных нелинейных свойств.

В данной работе разрабатывается подход к построению нелинейных моделей, основанный на применении функциональных полиномов Вольтерра [1].

Для всех трех указанных выше систем судовой автоматики характерна используемая общая структурная схема с обратной связью (рис.1), на которой УС – управляющая система (регулятор с исполнительными и усилительными устройствами), а ОУ – объект управления.

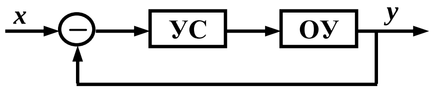

Рис.1. Общая структурная схема

С использованием функциональных полиномов Вольтерра модель объекта строится в виде

$$\widehat{\mathbf{y}}(\mathbf{t})=\sum_{\mathbf{i}=0}^{\mathbf{N}}\int_0^{\mathbf{t}}\ldots\int \mathbf{h_i}(\tau_1,\ldots,\tau_i)\prod_{\mathbf{r}=1}^{\mathbf{i}}\mathbf{x}(\mathbf{t}-\tau_r)\mathbf{d}\tau_1\ldots\mathbf{d}\tau_i\ . \qquad (1)$$

Для решения задачи идентификации ядра Вольтерра $\mathbf{h_i(\tau_1,\ldots,\tau_i)}$ представляются отрезками многомерных рядов Фурье

$$\mathbf{h_i}(\tau_1,\ldots,\tau_i)=\sum_{\mathbf{j_1}=0}^{\mathbf{M_i}}\ldots\sum_{\mathbf{j_i}=0}^{\mathbf{M_i}}\beta_{\mathbf{j_1},\ldots,\mathbf{j_i}}\prod_{\mathbf{r}=1}^{\mathbf{i}}\varphi_{\mathbf{j_r}}(\tau_r), \qquad (2)$$

в результате чего модель (1) записывается в виде

$$\widehat{\mathbf{y}}(\mathbf{t})=\sum_{\mathbf{i}=1}^{\mathbf{N}}\left\{\sum_{\mathbf{j_1}=0}^{\mathbf{M_1}}\ldots\sum_{\mathbf{j_i}=0}^{\mathbf{M_i}}\beta_{\mathbf{j_1},\ldots,\mathbf{j_i}}\prod_{\mathbf{r}=1}^{\mathbf{i}}\mathbf{z_{j_r}}(\mathbf{t})\right\}, \qquad (3)$$

где

$$\mathbf{z_j}(\mathbf{t})=\int_0^{\mathbf{t}}\varphi_{\mathbf{j}}(\tau)\mathbf{x}(\mathbf{t}-\tau)\mathbf{d}\tau\ . \qquad (4)$$

В качестве системы функций $\{\varphi_j(\tau)\}$для задач моделирования динамики судна целесообразно выбрать ортогональные полиномы Лагерра, позволяющие сразу же получить формулы для изображений ядер Вольтерра $\mathbf{H_1(p), \ldots, H_N(p_1, \ldots, p_N)}$. В качестве решения задачи идентификации примем тот набор коэффициентов Фурье, на котором

$$\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}\int_0^{\mathbf{r}}\left(\mathbf{y}(\mathbf{t})-\widehat{\mathbf{y}}(\mathbf{t})\right)^2\mathbf{dt}\to\mathbf{min}\ , \qquad (5)$$

где **T** – время эксперимента.

Этому набору коэффициентов соответствует система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{\mathbf{i}=1}^{\mathbf{N}}\left\{\sum_{\mathbf{j_1}=0}^{\mathbf{M_1}}\ldots\sum_{\mathbf{j_i}=0}^{\mathbf{M_i}}\beta_{\mathbf{j_1},\ldots,\mathbf{j_i}}\ \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}\int_0^{\mathbf{T}}\prod_{\mathbf{r}=1}^{\mathbf{i}}\mathbf{z_{k_r}}(\mathbf{t})\prod_{\mathbf{r}=1}^{\mathbf{n}}\mathbf{z_{j_r}}(\mathbf{t})\mathbf{dt}\right\}=\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}\int_0^{\mathbf{T}}\mathbf{y}(\mathbf{t})\prod_{\mathbf{r}=1}^{\mathbf{n}}\mathbf{z_{k_r}}(\mathbf{t})\mathbf{dt}\ . \qquad (6)$$

Модель (3) является фактически нелинейной регрессионной моделью, а использование конечного верхнего предела в суммах (2) позволяет осуществить регуляризацию задачи, которая является некорректной [2].

Коэффициенты регрессии можно найти также не решая СЛАУ (6), а используя тот или иной вариант метода поиска экстремума функций многих переменных. С этой целью введем в рассмотрение сигнал невязки **e(t)**:

$$\mathbf{e(t) = y(t) - \hat{y}(t)}. \tag{7}$$

Для критерия

$$\mathbf{Q(\eta) = \frac{1}{T}\int_0^T e^2(t)dt} \tag{8}$$

метод наискорейшего спуска дает такое уравнение настройки на **m+1** шаге:

$$\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{j1,...,j_i}}\mathbf{(m+1)} = \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{j1,...,j_i}}\mathbf{(m)} - \boldsymbol{\Gamma}\frac{\partial \mathbf{Q(m)}}{\partial \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{j1,...,j_i}}}, \tag{9}$$

где **Г** – масштабный множитель.

Настройку модели можно осуществить и по текущему значению невязки. Для критерия

$$\mathbf{Q(e) = |e(t)|} \tag{10}$$

схема настройки коэффициентов модели задается уравнением

$$\dot{\boldsymbol{\beta}}_{\mathbf{j1,...,j_i}}\mathbf{(t)} = -\boldsymbol{\Gamma}\left\{\mathbf{sign \cdot e(t)}\prod_{\mathbf{r=1}}^{\mathbf{n}}\mathbf{z}_{\mathbf{j_r}}\mathbf{(t)}\right\}. \tag{11}$$

Для критерия

$$\mathbf{Q(\eta) = e^2(t)}$$

получаем

$$\dot{\boldsymbol{\beta}}_{\mathbf{j1,...,j_i}}\mathbf{(t)} = -\mathbf{2}\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{e(t)}\prod_{\mathbf{r=1}}^{\mathbf{n}}\mathbf{z}_{\mathbf{j_r}}\mathbf{(t)}. \tag{12}$$

Схемы (9), (11) и (12) могут быть реализованы в дискретном времени, что существенно упрощает все процедуры.

После проведения идентификации объекта управления и нахождения изображений ядер для управляющей системы методами структурного анализа [1] расчет изображений ядер замкнутой системы управления на рис.1 осуществляется по общим формулам для отыскания ядер систем с обратной связью [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Суевалов Л.Ф. Самонастраивающиеся системы в судовой автоматике. – Л.: Судостроение, 1966. – 220 с.

2. Пупков К.А., Капалин В.И., Ющенко А.С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М.: Наука, 1976. – 386 с.

Поступила в редколлегию 29.10.2001