Ю.В. Човнюк, канд. тех. наук, доц. КНУСиА

Народився 29 квітня 1951 р.

У 1968 р. закінчив радіофізичний факультет Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка за спеціальністю "фізика і електроніка".

У 1973-1976 навчався в аспірантурі НДІ "Оріон". Працював молодшим співробітником НДІ "Оріон" до 1978 р.

З 1978 р. працює у КНУБА на посадах: старшого інженера, молодшого наукового співробітника, старшого наукового співробітника, доцента кафедри математики.

У 1991 р. захистив кандидатську дисертацію за спеціальністю "Механіка деформованого твердого тіла". З 1993 по 1996 рр. навчався в докторантурі при кафедрі ЕРБМ.

Автор 480 наукових публікацій.

Основні напрямки наукової діяльності: моделювання та аналітичний опис динамічних систем в умовах взаємодії з оброблюваним середовищем

УДК 62-83 (075.8)

МЕТОД СТРУКТУРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

Известно [1-4], что при исследовании динамических систем (и, в частности, непрерывных линеаризованных динамических систем электропривода разнообразных технических устройств), применяемых в строительной технике и технологиях, весьма важным этапом является составление схемы моделирования этих систем. С помощью, например, блок-схемы моделирования можно рациональным образом выбрать переменные состояния, характеризующие поведение указанных выше систем в каждый момент времени.

Целью настоящей работы является составление универсальной схемы моделирования непрерывных линеаризованных динамических систем электропривода технических устройств строительной индустрии на основе метода структурного представления. В данной работе рассмотрена процедура составления универсальной схемы моделирования, работающей при нулевых начальных условиях.

Подобные динамические системы описываются дифференциальным уравнением вида:

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \ldots + a_1 y^{(1)} + a_0 y = b_n u^{(n)} + b_{n-1}u^{(n-1)} + \ldots + b_1 u^{(1)} + b_0 u \qquad (1)$$

или передаточной функцией:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_n p^n + b_{n-1}p^{n-1} + \ldots + b_1 p + b_0}{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0}. \qquad (2)$$

Примем, что:

$$\begin{cases} x_1 = y - \beta_0 u, \\ x_2 = y^{(1)} - \beta_0 u^{(1)} - \beta_1 u = \dot{x}_1 - \beta_1 u, \\ x_3 = y^{(2)} - \beta_0 u^{(2)} - \beta_1 u^{(1)} - \beta_2 u = \dot{x}_2 - \beta_2 u, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_n = y^{(n-1)} - \beta_0 u^{(n-1)} - \beta_1 u^{(n-2)} - \dots - \beta_{n-2} u^{(1)} - \beta_{n-1} u = \dot{x}_{n-1} - \beta_{n-1} u. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда получим:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y^{(1)} - \beta_0 u^{(1)} = x_2 + \beta_1 u, \\ \dot{x}_2 = y^{(2)} - \beta_0 u^{(2)} - \beta_1 u^{(1)} = x_3 + \beta_2 u, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dot{x}_{n-1} = y^{(n-1)} - \beta_0 u^{(n-1)} - \dots - \beta_{n-2} u^{(1)} = x_n + \beta_{n-1} u, \\ \dot{x}_n = y^{(n)} - \beta_0 u^{(n)} - \dots - \beta_{n-1} u^{(1)} + \beta_n u = -a_0 x_1 - a_1 x_2 - \dots - a_{n-1} x_n + \beta_0 u, \\ y = x_1 + \beta_0 u, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{cases} \beta_0 = b_n ; \beta_1 = b_{n-1} - a_{n-1}\beta_0 ; \beta_2 = b_{n-2} - a_{n-1}\beta_1 - a_{n-2}\beta_0 ,..., \\ \beta_n = b_0 - a_{n-1}\beta_{n-1} - a_{n-2}\beta_{n-2} - \dots - a_1\beta_1 - a_0\beta_0 . \end{cases} \quad (5)$$

Введём вектор:

$$X = [x_1, x_2, ..., x_n]^T , \quad (6)$$

тогда получим описание пространства состояния анализируемой системы:

$$\begin{cases} \dot{X} = A \cdot X + B \cdot u, \\ y = C \cdot X + d \cdot u, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\text{A}=\begin{bmatrix} 0 \quad 1\dots\dots\dots\dots0 \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ 0 \quad 0\dots\dots\dots\dots1 \\ -a_0 \; -a_1 \dots\dots -a_{n-1} \end{bmatrix}, \; B = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \; C = [1,0,...,0], \; d = \beta_0 = b_n . \quad (8)$$

Подобный подход к моделированию изучаемых систем чрезвычайно удобен и пригоден, в особенности, для систем модального управления.

Рассмотрим несколько примеров.

1. Пусть дана замкнутая система с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{9{,}0 \cdot p + 0{,}64}{p^3 + 0{,}3 \cdot p^2 + 9{,}6 \cdot p + 0{,}64}, \quad p \equiv \frac{d}{dt}, \quad (9)$$

где t – время.

Схему моделирования такой системы легко представить в Matlab. В пространстве состояний она имеет вид (7), где

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix},\ a_{11}=a_{21}=a_{22}=a_{13}=0,\ a_{12}=a_{23}=1,\ a_{31}=-0{,}64; a_{32}=-9{,}6; a_{33}=-0{,}3;$$

$$B=\begin{bmatrix} 0 \\ 9 \\ -2{,}06 \end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix},\ d=0. \tag{10}$$

2. Передаточные функции электромагнитного усилителя (ЭМУ), работающего совместно с исполнительным двигателем (ИД) постоянного тока независимого возбуждения, приведены в [1]:

$$W(p)=\frac{k_y}{(T_M T_a p^2+T_M p+1)\cdot(T_y p+1)}, \tag{11}$$

где k_y – передаточный коэффициент (коэффициент усиления) ЭМУ по управляющему воздействию; T_M – механическая постоянная времени двигателя; T_y – постоянная времени цепи управления; T_a – постоянная времени якорных цепей ЭМУ-ИД.

Передаточная функция по отношению к возмущающему воздействию $V(p)$ представляет собой:

$$V(p)=-\frac{k_f\cdot(T_y p+1)\cdot(T_a p+1)}{(T_M T_a p^2+T_M p+1)(T_y p+1)}, \tag{12}$$

где k_f – передаточный коэффициент ЭМУ по возмущающему воздействию.

Схему моделирования ЭМУ-ИД также легко представить в Matlab. В пространстве состояний (7) для (11) и (12) получим:

Для (11)

$$A=\|a_{ij}\|,\ (i,j)=1,2,3;\ a_{11}=a_{13}=a_{21}=a_{22}=0;\ a_{12}=a_{23}=1;$$

$$a_{31}=-\frac{1}{T_M T_a T_y}; a_{32}=-\frac{(T_M+T_y)}{T_M T_a T_y}; a_{33}=-\frac{(T_a+T_y)}{T_a T_y};\ d=0; \tag{13}$$

$$B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{k_y}{T_M T_a T_y} \end{bmatrix};\ C=[1;0;0].$$

для (11)- матрицы A и C совпадают с (13), $d=0$, а для матрицы получим:

$$B=[\beta_1;\beta_2;\beta_3]^T, \tag{14}$$

$$\beta_1=-\frac{k_f}{T_m};\ \beta_2=-\frac{k_f\cdot(T_y+T_a)}{T_M T_a T_y}+\frac{(T_a+T_y)\cdot k_f}{T_a T_y T_M};\ \beta_3=-\frac{k_f}{T_M T_a T_y}+\frac{(T_M+T_y)\cdot k_f}{T_M{}^2\cdot T_a\cdot T_y}. \tag{15}$$

3. В анализе механической части электропривода различных технических устройств строительной индустрии [5] принято структурно её представлять как сложный объект, состоящий из цепочки интегрирующих звеньев, замкнутых перекрёстными внутренними обратными связями. Пользуясь известными методами преобразования структурных схем и определения передаточных функций для замкнутых обратными

связями контуров [6,7], получим передаточную функцию механической части электропривода (в пределах модели трёхмассовой упругой системы) по управляющему воздействию при выходной переменной $\omega_1(p)$ (ω_1 – угловая скорость вращения ротора двигателя):

$$W_{\omega_1}(p)=\frac{\omega_1(p)}{M(p)}=\frac{J_2J_3p^4+[c_{23}\cdot(J_2+J_3)+c_{12}\cdot J_3]p^2+c_{12}\cdot c_{23}}{p\{J_1J_2J_3p^4+[J_1c_{23}(J_2+J_3)+J_3c_{12}(J_1+J_2)]p^2+c_{12}c_{23}(J_1+J_2+J_3)\}},\qquad(16)$$

где M – электромагнитный момент, приложенный к ротору двигателя; $J_{1,2,3}$ – суммарные приведенные моменты инерции массы ротора и жёстко связанных с ним элементов промежуточной массы, а также нагрузки двигателя, соответственно; c_{12}, c_{23} – эквивалентные приведенные жесткости, связывающие соответствующие массы (первую со второй, а также вторую с третьей, соответственно).

Тогда в представлении (7) получим для этого примера:

$$\begin{aligned}&a_0=0;a_1=\frac{c_{12}c_{23}\cdot(J_1+J_2+J_3)}{J_1J_2J_3};a_2=0;a_3=\frac{[J_1c_{23}\cdot(J_2+J_3)+J_3c_{12}(J_1+J_2)]}{J_1J_2J_3};\\&a_4=0;b_0=\frac{c_{12}c_{23}}{J_1J_2J_3};\qquad(17)\\&b_1=0;b_2=\frac{c_{23}\cdot(J_2+J_3)+c_{12}J_3}{J_1J_2J_3};b_3=0;b_4=\frac{1}{J_1};b_5=0.\end{aligned}$$

Тогда матрица A имеет $\dim A=[5\times5]$; $\dim B=[5\times1]$; $C=[1;0;0;0;0]$; $d=0$. Элементы матриц A и B легко найти по соотношениям (1)-(5).

Выводы

1. Метод структурного представления непрерывных линеаризованных динамических систем электропривода различных технических устройств строительной индустрии позволяет рациональным образом выбирать переменные состояния, характеризующие поведение указанных систем в каждый момент времени.
2. Предложен алгоритм составления универсальной схемы моделирования указанных выше систем, работающей при нулевых начальных условиях.
3. Подобный подход можно использовать для создания, уточнения и совершенствования существующих инженерных методик расчёта таких систем и, в особенности, переходных процессов, протекающих в них.

Литература

1. *Иванов В.А.* и др. Математические основы теории автоматического регулирования. – М.: Высшая школа, 1971. – 808с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. – Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления./Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736с.
3. Linear System Theory (Second Edition)./Zheng Dazhong. – Beijing: TUP, 2000. – 706p.
4. *Чанцин Ван,Ниншен Гуо.* Структурное представление непрерывных линейных динамических систем//Естественные и технические науки. – 2005. – №1. – С. 131-134.
5. *Ключев В.И.* Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.
6. Теория автоматического управления/Под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1968. – Ч.I. – 424с.; 1972. – Ч. II. – 430с.
7. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 450с.