УДК 621-52

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С НАСТРАИВАЕМОЙ МОДЕЛЬЮ

Канд. техн. наук, доц. ОПЕЙКО О. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Адаптивные системы с настраиваемыми моделями находят широкое применение в современных комплектных устройствах управления электроприводами. Одним из преимуществ систем с настраиваемыми моделями является возможность использования настраиваемой модели объекта не только для адаптации, но и для оценивания недоступных для измерения переменных состояния. Синтезу систем управления электроприводами с настраиваемыми моделями посвящены [1...3]. В [2] приводится теоретический анализ системы с дуальной моделью, которая позволяет выполнять функции как эталонной модели, задающей показатели качества, так и идентификацию параметрических возмущений.

В данной работе рассматривается метод синтеза подобной системы в случае, когда адаптация должна выполняться быстрее, чем происходит переходный процесс основного контура, а параметры объекта можно считать постоянными в течение времени этого процесса. Применяется разделение движений на быструю и медленную составляющие.

Рассмотрим синтез системы с настраиваемой дуальной моделью в следующих предположениях. Система содержит основной контур и контур адаптации, воздействующий на модель и регулятор. Начальные значения параметров регулятора определены из критерия качества и расчетных параметров объекта. В процессе функционирования параметры объекта отклоняются от расчетных, но их изменение настолько медленное, что в течение переходного процесса их можно считать постоянными. Линеаризованный объект описывается уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u. \qquad (1)$$

Здесь $\mathbf{x}$ – n-вектор переменных состояния; $\mathbf{A}$ – $n \times n$ – матрица параметров объекта; $\mathbf{B}$ – $n \times m$ – матрица; u – скалярное управление. Параметры объекта, входящие в матрицы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$, подвержены изменениям относительно расчетных значений A_0 и B_0.

Настраиваемая модель удовлетворяет уравнению

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M u_M. \qquad (2)$$

Сигнал управления, синтезируемый в результате интегральной квадратичной оптимизации, при расчетных значениях параметров должен иметь вид

$$u_0 = u_з - \mathbf{K}\mathbf{x}, \qquad (3)$$

где $\mathbf{K}$ – матрица обратных связей; $u_з$ – задающее воздействие. В результате такого синтеза матрица замкнутой системы должна совпадать с желаемой

$$\mathbf{A}_D = \mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0\mathbf{K}.$$

Ввиду действующих на объект возмущений как внешних, так и внутренних (параметрических), появляется дополнительное движение

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_M. \qquad (4)$$

Следует отметить, что в формировании сигнала управления (3) могут применяться переменные состояния объекта, доступные, а также недоступные для измерения, оцениваемые с помощью настраиваемой модели. Тогда в сигнале управления используется вектор $\bar{\mathbf{x}}$ = $=(x_1, ..., x_m, x_{M\,m+1}, ..., x_{Mn})$.

Тогда сигнал управления примет вид

$$u_0 = u_3 - \mathbf{K}\bar{\mathbf{x}}.$$

Сигнал перенастройки u_a формируется на основании вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ дополнительного движения

$$u_a = f_a(\mathbf{q}^T\boldsymbol{\varepsilon}), \quad (5)$$

где $\mathbf{q}$ – вектор постоянных параметров.

Потребуем, чтобы сигналы управления:

$$u = f_0(u_0, u_a); \quad u_M = f(u, u_a), \quad (6)$$

подаваемые на объект и настраиваемую модель, удовлетворяли условию

$$\mathbf{A}_M\mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M f(u, u_a) = \mathbf{A}_0\mathbf{x} - \mathbf{B}_0 u_0. \quad (7)$$

Это условие обеспечивает заданные динамические свойства контура, содержащего регулятор и настраиваемую модель.

Если параметры модели равны расчетным параметрам объекта, т. е. $\mathbf{A}_M = \mathbf{A}_0$; $\mathbf{B}_M = \mathbf{B}_0$, то $\mathbf{x} = \mathbf{x}_M$ и функции $f_0(u_0, u_a)$; $f_0(u, u_a)$ должны быть связаны выражением

$$f(u, u_a) = f(f_0(u_0, u_a), u_a) = u_0. \quad (8)$$

Это означает, что функции $f_0(u_0, u_a)$; $f_0(u, u_a)$ должны быть взаимно обратными.

Приведем простейшие примеры таких функций:

$$f_0(u_0, u_a) = u_0 + a_1 u_a + a_0; \qquad f(u, u_a) = u - a_1 u_a - a_0. \quad (9)$$

Второй пример:

$$f_0(u_0, u_a) = u_0(a_1 u_a + a_0); \qquad f(u, u_a) = u/(a_1 u_a + a_0). \quad (10)$$

При выполнении условия (8) и близости динамических свойств модели и объекта будет выполнено условие (7). Чтобы система в целом имела заданные динамические свойства, необходимо обеспечить условие

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \to 0,$$

которое означает устойчивость процесса самонастройки. Замкнутая система с настраиваемой моделью при условиях (7), (8) описывается уравнениями:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}f_0(u_0, u_a); \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M\mathbf{x}_M - \mathbf{B}_M\mathbf{K}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_M u_3. \quad (12)$$

Вычитая из первого уравнения второе и учитывая (6), получим

$$\dot{\varepsilon} = \mathbf{A}_M\varepsilon - \mathbf{B}_M f(u, u_a) + \mathbf{B}u - \mathbf{B}_M u_3 + (\mathbf{A} - \mathbf{A}_M)\mathbf{x}. \quad (13)$$

Рассмотрим условия разделения движений основного контура данной системы и процесса настройки, происходящего на порядок быстрее. Величины $\mathbf{x}$ и u в выражении (13), поскольку они мало изменяются на решениях, можно рассматривать как постоянные параметры. Матрица Якоби уравнения (13) в этом случае имеет вид

$$\mathbf{A}_M - \mathbf{B}_M\frac{\partial f}{\partial u_a}q.$$

Вектор параметров настойки $\mathbf{q}$ рассчитывается таким образом, что наименьшее по модулю собственное значение α матрицы Якоби значительно превосходит наибольшее по модулю собственное значение δ матрицы $\mathbf{A}_d$:

$$\alpha > \delta$$

и обеспечиваются условия устойчивости. Если правую и левую части уравнения (13) разделить на α и обозначить $\tau_\alpha = 1/\alpha$, то (11) и (13) примут вид:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}f_0(u_0, u_a);$$

$$\tau_\alpha\dot{\varepsilon} = \mathbf{A}_{M1}\varepsilon - \mathbf{B}_{M1}f(u, u_a) + \mathbf{B}\tau_\alpha u - \mathbf{B}_{M1}u_3 + \tau_\alpha(\mathbf{A} - \mathbf{A}_M)\mathbf{x}. \quad (14)$$

Здесь

$$\mathbf{A}_{M1} = \mathbf{A}_M / \alpha; \ \mathbf{B}_{M1} = \mathbf{B}_M / \alpha.$$

Последняя система удовлетворяет условиям теоремы А. Н. Тихонова [4]. Это означает, что для малых τ_α решения системы (14) асимптотически приближаются к решению при $\tau_\alpha = 0$. Для малых τ_α второе уравнение системы (14) примет вид

$$\mathbf{A}_{M1}\varepsilon - \mathbf{B}_{M1} f(u, \mathbf{q}^T \varepsilon) = 0. \tag{15}$$

Следует, таким образом, построить функцию f, обеспечивающую настройку модели, чтобы при всех u = const алгебраическое уравнение (15) имело корень $\boldsymbol{\varepsilon} = 0$. Это выполнимо, если в выражениях (9), (10) принять $a_0 = 0$. По условиям физической реализуемости величина a_0 может быть выбрана достаточно малой. Тогда при конечных, но достаточно малых τ_α решение системы (14) будет асимптотически приближаться к решению (15).

Рассмотрим пример синтеза управления объектом второго порядка, который описывается уравнениями:

$$\dot{x}_1 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = -a_{21}x_1 - a_{22}x_2 + b\,u. \tag{16}$$

Здесь сигнал управления для обеспечения астатизма формируется с использованием интеграла x_0 ошибки выходной величины x_1:

$$u_0 = ((u_3 - k_1 x_1)b_1 + k_0 x_0 - k_2 x_2)b_2; \tag{17}$$

$$x_0 = \int_0^t (u_3 - k_1 x_1)dt.$$

Сигнал управления формируется в соответствии с (9) с учетом сигнала настройки:

$$u = u_0/(u_a + b_0); \ \ |u| \le u_{\max}.$$

В последнем выражении в качестве u_α применяется его среднее значение.

Настраиваемая модель описывается уравнениями:

$$\dot{x}_{M1} = x_{M2};$$

$$\dot{x}_{M2} = -a_{21}x_{M1} - a_{22}x_{M2} + b_M u_M. \tag{18}$$

Здесь в соответствии с (10), (5):

$$u_M = u(u_a + b_0);$$

$$u_a = q_1(x_1 - x_{M1}) + q_2(x_2 - x_{M2}). \tag{19}$$

Если принять предположение: $u = u_{\max}$ = const; x = const, то матрица Якоби настраиваемой модели с управлением (19) примет вид

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_{21} - b_M q_1 u_{\max} & -a_{22} - b_M q_2 u_{\max} \end{bmatrix}.$$

Характеристический полином линеаризованной настраиваемой модели будет

$$N_{HM}(p) = \det(\mathbf{E}p - \mathbf{A}_1) =$$

$$= p^2 + (a_{22} + b_M q_2 u_{\max})p + a_{21} + b_M q_1 u_{\max}.$$

Параметры q_1, q_2 контура настройки рассчитываются таким образом, чтобы собственные значения матрицы A_1 значительно превосходили по модулю корни характеристического полинома замкнутого основного контура.

При значениях параметров объекта: $a_{21} = a_{22} = 10$; $b = 10$, принимая $\alpha = 10$, получим параметры регулятора основного контура: $k_0 = 100$; $k_1 = 0{,}1$; $b_1 = 190$; $k_2 = 1$; $b_2 = 1{,}0$; $b_0 = 1{,}0$. Если принять для настройки модели: $\alpha_{HM} = 500$; $b_M = 50$; $u_{\max} = 10$; $u_{\alpha\,\max} = 1$, то получим, считая динамику контура настройки, близкой к звену первого порядка, параметры контура настройки: $q_1 = 250$; $q_2 = 5$. Результаты моделирования данной системы при расчетных значениях параметров представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, настраиваемая модель правильно воспроизводит движение объекта. На рис. 2 показаны процессы в случае, когда объект отличается от расчетной модели наличием на его входе инерционного звена с малой постоянной времени $T_0 = 0{,}1$. Процесс настройки модели приближается к скользящему режиму.

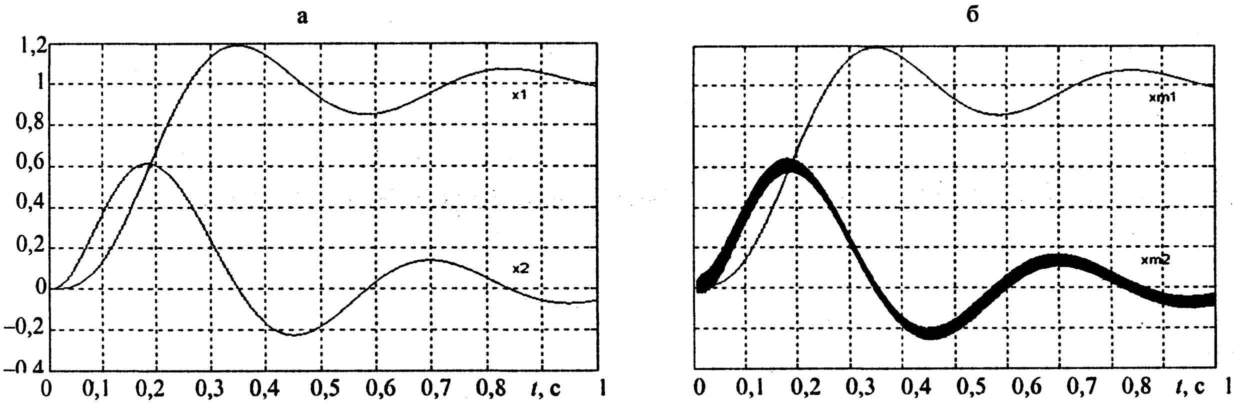
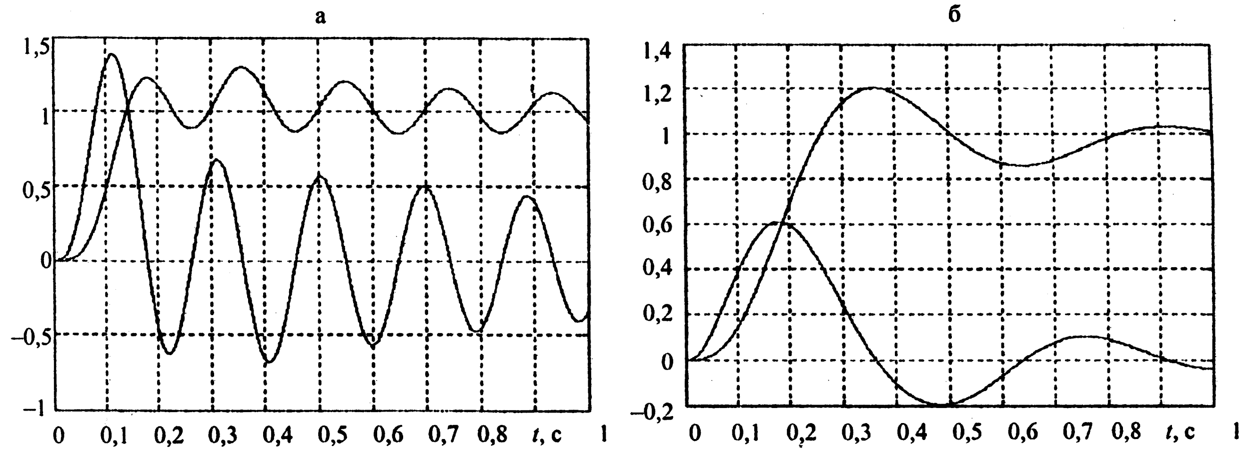


Рис. 1. Процесс при расчетных значениях параметров: а – переменные объекта; б – переменные модели



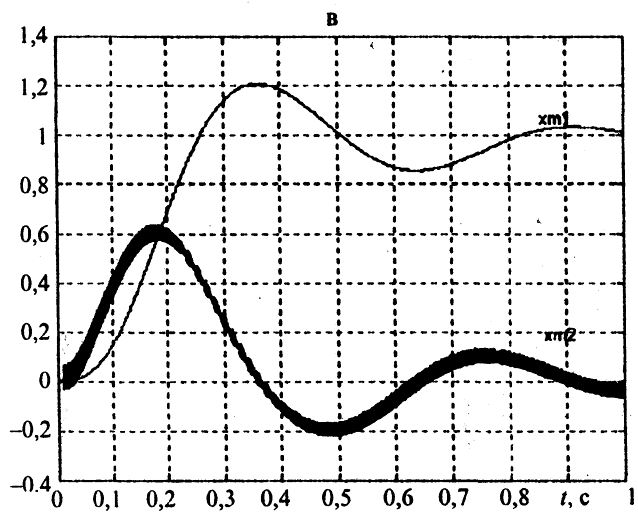


Рис. 2. Процессы при возмущении в объекте: а – без адаптации; б, в – в объекте и модели соответственно при наличии адаптации

ВЫВОДЫ

1. Синтез адаптивной системы с настраиваемой моделью может быть выполнен в два этапа на основании линеаризации системы и разделения движений.

2. Для обеспечения стабильных показателей качества при изменениях динамических

свойств объекта необходимо высокое быстродействие контура адаптации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В.** Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
2. **Борцов Ю. А., Юнгер И. Б.** Автоматические системы с разрывным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
3. **Elbuluk Malik, Langovsky Nikola, Kankam David.** Design and Implementation of a Closed-Loop Observer and Adaptive Controller for Induction Motor Drives // IEEE Trans. on Industry Application. – 1998. – Vol. 34, № 3. – P. 435–442.
4. **Тихонов А. Н.** Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных: Матем. сб. – 1953. – Т. 31(73), № 3. – С. 375–386.

УДК 621.38

РАСЧЕТ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ pH СМЕСИ КИСЛОТ И ЩЕЛОЧЕЙ

Инж. ВОРОБЕЙ Р. И., канд. физ.-мат. наук ГУСЕВ О. К.

Белорусский национальный технический университет

В технологических процессах ряда отраслей производства (машиностроении, приборостроении, энергетике, электротехнической, электронной, пищевой) используются растворы кислот и щелочей. Отработанные растворы должны подвергаться нейтрализации до уровня показателя pH, соответствующего санитарным и экологическими требованиями к промышленным стокам, согласно которым предприятия подлежат оснащению станциями нейтрализации, работающими в автоматическом режиме [1, 2]. В проектной документации предусмотрено использование структурной схемы станции, основанной на измерении показателя pH смеси кислот и щелочей с помощью потенциометрических pH-метров промышленного типа (рис. 1). Точность контроля pH, а следовательно, и управления процессом нейтрализации в этом случае ограничивается несколькими факторами:

• растворы, требующие нейтрализации, содержат примеси, не влияющие непосредственно на показание pH, однако образующие пленочные отложения на поверхности мембран стеклянных электродов. Особенно остро такая проблема стоит перед предприятиями пищевой промышленности, технологические среды которых – это сложные дисперсные системы с присутствием эмульсий (например, жиров), коллоидных растворов (например, казеина) и других составляющих. Пленкообразование на поверхности чувствительных элементов датчиков приводит к росту погрешности измерений с течением времени. Применение специальных механизмов с приводом для очистки электродов, как показывает опыт, не решает проблемы метрологической исправности канала измерения pH [2];

• в процессе нейтрализации происходит образование солей металлов, концентрация которых возрастает с приближением раствора к нейтральному. Наличие солей также приводит к увеличению погрешности измерений.

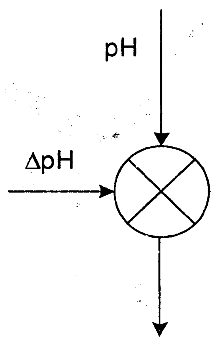


Рис. 1