

Идентификационный синтез адаптивных систем управления ТП

Г.Р. Болквядзе (Институт кибернетики ГАН)

Рассматривается синтез адаптивных систем управления (АДСУ) электрическими печами (ЭП) для ТП плавки ферросплавов на основе методов идентификации. Показано, что с помощью модели взаимосвязи "мощность – сила тока" осуществляется адаптивное управление для достижения максимальной мощности при минимальном значении силы тока.

На современном этапе при автоматизации производства большое внимание уделяется синтезу АДСУ [1]. Это связано с необходимостью создания управляющих систем, не требующих полной априорной информации об объекте и условиях его функционирования. Обычно неадаптивные методы управления требуют знания адекватной математической модели объекта, а качество управления при помощи таких методов тем выше, чем точнее модель. Реальные объекты такие, как ТП в металлургической, теплоэнергетической, химической промышленности, биологические и медицинские системы, экологические, экономические, социальные системы обычно характеризуются сложными структурами. Они являются стохастическими, нелинейными, нестационарными, многомерными и многосвязными и обладают, с точки зрения организации процесса управления, многими "неудобными" свойствами. Эти свойства выражаются недостаточностью априорной информации об объекте и условиях его функционирования. Создание для этих систем адекватной математической модели представляет сложную самостоятельную задачу, решить которую можно с применением методов идентификации. Эффект приспособления АДСУ к условиям функционирования сложной системы обеспечивается за счет накопления и обработки информации о поведении объекта в процессе его функционирования, что позволяет снизить влияние неопределенности на качество управления. В связи с этим рассмотрим вопросы построения адаптивной системы управления с идентификатором в цепи обратной связи – АСИ [2], и ее расширенного варианта – АДСУ для управления ЭП ферросплавного производства.

Функционирование АДСУ

На первом этапе при нормальном функционировании исследуемого объекта в дискретные моменты времени $k = l, 2l, \dots$ измеряются вектор входных величин $x(k+1-\tau) = [x_1(k+1-\tau), \dots, x_p(k+1-\tau)]^T$ и выходная величина $y(k)$. Последовательность $\{x_j(k+1-\tau), y(k)\}_{k=l}^{\infty}, j = \overline{1, p}, \tau = \overline{1, l}$ представляет бесконечную выборку статистически независимых наблюдений случайных двумерных процессов $(X_j(k+1-\tau), Y(k)), j = \overline{1, p}, \tau = \overline{1, l}$, где p – число входов, l – глубина памяти [3]. С помощью методов идентификации строится следующая динамическая модель взаимосвязи вход/выход:

$$\hat{y}(k) = \sum_{j=1}^p \left[\sum_{i=1}^l g_j(i) u_j(k, i) + \sum_{i=1}^l h_j(i) v_j(k, i) \right] + u_{N-1} =$$

$$= z^T(k) w + u_{N-1}, k = (l+1)l, (l+2)l, \dots \quad (1)$$

В модели (1) приняты следующие обозначения.

Вектор непараметрических оценок взаимно регрессионных функций выходного процесса $Y(k)$ от координат входного процесса $X_j(k+1-i)$ и авторегрессионных функций $X_j(k)$ относительно $X_j(k+1-i)$, $j = \overline{1, p}, \tau = \overline{1, l}$, сущность и оценки которого представлены в [3]:

$$\begin{aligned} z(k) &= [u_1^T(k), v_1^T(k), \dots, u_p^T(k), v_p^T(k)]^T \in R^{2pl} \\ u_j(k) &= [u_j(k, 1), \dots, u_j(k, l)]^T \in R^l, \\ v_j(k) &= [v_j(k, 1), \dots, v_j(k, l)]^T \in R^l \end{aligned} \quad (2)$$

Вектор весовых коэффициентов, координаты которого представляют значения доли (веса) каждого входа модели по времени при формировании выхода модели и которые требуется определить:

$$\begin{aligned} w &= [g_1^T, h_1^T, \dots, g_p^T, h_p^T]^T \in R^{2pl} \\ g_j &= [g_j(1), \dots, g_j(l)]^T \in R^l, \\ h_j &= [h_j(1), \dots, h_j(l)]^T \in R^l \end{aligned} \quad (3)$$

В системе (1) u_{k-1} является управляемым входом, который отключен в процессе идентификации в открытом контуре управления.

Задача определения вектора весовых коэффициентов решается как задача рекуррентной идентификации. Суть этой задачи в следующем. Вводится критерий качества идентификации вида

$$\begin{aligned} J^{(N)}(w) &= M_N [y(k) - \hat{y}(k)]^2 = \\ &= \frac{1}{N-l} \sum_{k=(l+1)l}^N [y(k) - z^T(k)w]^2, \\ N &= l+1, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

где M_N – символ оценки математического ожидания на основе статистик с длиной N . Задача идентификации заключается в определении такого оптимального значения, w_N , для которого при каждом N оценка (4) достигает минимума

$$w_N = \arg \min_{w \in R^d} J^{(N)}(w).$$

Для нахождения точки минимума применяются стохастические градиентные алгоритмы рекуррентной идентификации из двух классов. Первому классу принадлежат те алгоритмы, которые требуют знание градиента средних потерь (4) и имеют вид

$$\begin{aligned} w_N &= w_{N-1} + [K_{ZZ}^{(N)} + \gamma_N E]^{-1} (K_{YZ}^{(N)} - K_{ZZ}^{(N)} w_{N-1}), \\ N &= l+1, \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где $K_{YZ}^{(N)}$ – вектор оценки взаимно корреляционных функций вектора наблюдений

Синтез систем управления есть смелое задание науке и технике...

Журнал "Автоматизация в промышленности"

$Y(N) = [y((l+1)l), \dots, y(Nl)]^T \in R^{N-1}$ и матрицы наблюдений $Z(N) = [z((l+1)l), \dots, z(Nl)] \in M_{2pb \times (N-1)}$, а $K_{ZZ}^{(N)}$ – матрица оценки взаимно корреляционной функции матриц наблюдений $Z(N)$. γ_N – произвольная ограниченная последовательность положительных чисел, которая придает свойство положительной определенности матрице $K_{ZZ}^{(N)}$. Этому классу алгоритмов принадлежат, например, алгоритмы Ньютона-Рафсона (АНР), Гауса и т.д.

Второй класс образуют алгоритмы, где вместо градиента средних потерь фигурирует градиент квадратичных потерь и которые непосредственно зависят от наблюдения $z(Nl)$. Рекуррентные алгоритмы данного класса тесно связаны с методом стохастической аппроксимации (СА) и имеют вид

$$w_N = w_{N-1} + r_N^{-1} [y(Nl) - z^T(Nl)w_{N-1}]z(Nl). \quad (6)$$

Конкретный вид r_N определяют тот или иной вариант метода СА. Если в (6) положим, что

$$r_N = \left[\sum_{k=l+1}^N z(kl)z^T(kl) \right] / (N-l),$$

то получим алгоритм усредненного метода наименьших квадратов (УМНК). При $r_N = [1 + z^T(Nl)z(Nl)]$ получим алгоритм Качмажа (АК).

Перечисленные рекуррентные алгоритмы идентификации характеризуются высокой точностью и скоростью сходимости. Результатом решения задачи идентификации является конкретное значение вектора весовых коэффициентов w_{N_0} , где N_0 – номер шага, на котором оценка (4) достигает минимума с точностью идентификации $0 \leq \varepsilon < 1$.

Эти качества дают возможность применять (1) в задачах адаптивного управления выхода объекта в замкнутом контуре АдСУ, что и является вторым этапом ее функционирования.

В замкнутом контуре АдСУ вырабатывается такое управление u_{N+1} , $N > N_0$, чтобы значение выхода модели было равно заранее заданному значению выхода объекта y_{N+1}^* . Последовательность $\{y_{N+1}^*\}$ является ограниченной неслучайной последовательностью. Тогда система стабилизации описывается набором уравнений:

- объекта

$$\hat{y}(N+1) = z^T(N+1)w_N, \quad N \geq (N_0+1)l, (N_0+2)l, \dots; \quad (7)$$

-идентификатора для алгоритма (5)

$$w_N = \pi_D \{w_{N-1} + [K_{ZZ}^{(N)} + \gamma_N E]^{-1} (K_{YZ}^{(N)} - K_{ZZ}^{(N)} w_{N-1})\}; \quad (8)$$

- идентификатора для алгоритма (6)

$$w_N = \pi_D \{w_{N-1} + r_N^{-1} [y(N) - z^T(N)w_{N-1}]z(N)\}, \quad (9)$$

где π_D – проекция на $D = \{w_N : \|w_N - w_{N_0}\| \leq L\}$ – ограниченную область вектора весовых коэффициентов, который содержит точку минимума теоретического значения оценки (4);

- регулятора

$$u_{N+1} = y_{N+1}^* - z^T(N+1)w_N. \quad (10)$$

Управление (10) подается на управляющий вход объекта с целью обеспечения стабилизации выхода объекта.

Для стабильного функционирования АдСУ должна характеризоваться следующими свойствами:

- устойчивостью

$$\overline{\lim}_{N_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{N_2 - N_0} \sum_{n=N_0+1}^{N_2} |u_n|^2 < \infty, \quad \overline{\lim}_{N_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{N_2 - N_0} \sum_{n=N_0+1}^{N_2} |\hat{y}_{n+1}|^2 < \infty \quad (11)$$

почти наверное (п.н.);

- оптимальностью

$$\overline{\lim}_{N_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{N_2 - N_0} \sum_{n=N_0+1}^{N_2} (\hat{y}_{n+1} - y_{n+1}^*)^2 = 0 \text{ п.н.}; \quad (12)$$

- состоятельностью

$$\overline{\lim}_{N_0 \rightarrow \infty} w_{N_0} = w^* \text{ п.н.}, \quad (13)$$

где $w^* \in D$ – точка минимума теоретического значения оценки (4).

Условия (11)–(13) означают, что для решения задачи слежения можно определить оптимальное адаптивное управление в том смысле, что в асимптотике ошибка слежения будет минимальной, оценка параметров сильно состоятельной и АдСУ будет устойчивой.

Практическое использование АдСУ

Разработанная АдСУ была применена на заводах ферросплавного производства для адаптивного управления мощностью ЭП с целью достижения максимальной мощности ЭП при минимальном значении силы тока. ЭП представляет собой многосвязный объект управления [4], в котором одновременно протекают электрические, тепловые и физико-химические процессы. Техничко-экономические показатели конечного продукта плавки в целом определяются согласованным развитием этих процессов. Основным фактором, определяющим производительность ЭП, является его мощность. Для выбора рационального электрического режима плавки необходимо знание электрических характеристик ЭП. Этими характеристиками являются значения активной мощности и мощности дуг, коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента мощности на заданной ступени напряжения при различных значениях тока электрода. Анализ характеристик показывает, что с ростом тока электрода I_ϑ потери мощности в подводящей сети $P_{пот}$ растут пропорционально квадрату силы тока, а полезная $P_{пот}$ и активная P_a мощности сначала растут, достигая максимума, а затем падают. Максимум активной мощности наступает при равенстве активной и реактивной мощностей ЭП. При этом коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,707$. Коэффициент мощности $\cos \varphi$ и КПД ЭП η_ϑ с ростом тока уменьшаются, причем при коротком замыкании $\eta_\vartheta = 0$. Поэтому экономичным электрическим режимом является работа

ЭП при минимальных значениях I_{Σ} для которой P_a максимальна. В этом случае P_{nom} практически максимальна, а значения $\cos \varphi$ и η_{Σ} достаточно велики. В данной ситуации считается, что параметры ЭП одинаковы по фазам. Но так как трансформатор, питающий ЭП, трехфазный, зависимость активной мощности от силы тока одновременно на всех трех фазах усложняется. Поэтому возникает необходимость установить эту взаимосвязь непосредственно во время работы ЭП.

Для построения модели взаимосвязи "мощность — сила тока" ЭП заводов ферросплавов г.г. Зестафони (Грузия) и Никополь (Украина) были сняты данные по значениям активной мощности $P_a(k)$ и силы тока трех фаз ($I_1(k)$, $I_2(k)$, $I_3(k)$), $k = \overline{1,500}$. На основе этих статистик построена нелинейная динамическая модель

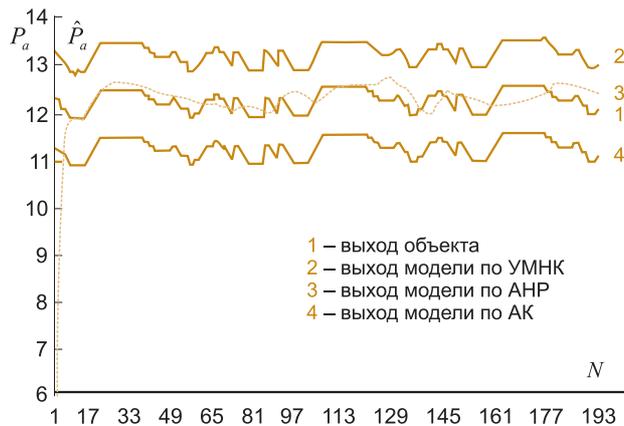
$$\hat{P}_a(N) = \sum_{j=1}^3 \left[\sum_{i=1}^4 (g_j(i) u_j(N, i) + h_j(i) v_j(N, i)) \right] = z^T(N) w, \quad (14)$$

где: $\hat{P}_a(N)$ — оценка активной мощности в момент времени $N = \overline{5,500}$, $u_j(N, i)$ — оценка условного математического ожидания P_a относительно силы тока j -ой фазы; $v_j(N, i)$ — оценка авторегрессии силы тока j -ой фазы, $j = \overline{1,3}$.

В качестве рекуррентных алгоритмов идентификации взяты: формулы (5), (6) и алгоритм Качмажа. Результаты моделирования выхода объекта представлены на рисунке, где кривая 1 представляет значения активной мощности $P_a(k)$, а кривые 2, 3, 4 — соответственно значения, вычисленные по модели (14) с использованием алгоритмов АНР, УМНК и АК. Видно, что модель (14) хорошо аппроксимирует значения активной мощности ЭП, что дает возможность ее использования в задачах адаптивного управления мощностью ЭП в замкнутом контуре управления.

В замкнутом контуре управления было реализовано адаптивное управление с целью стабилизации

Болквядзе Гиви Ризаевич — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник Института кибернетики ГАН. Контактный телефон (095) 334 - 92- 61. E-mail: geogivi@mail.ru



мощности ЭП вблизи максимального ее значения (примерно 12 МВт), что достигалось достаточно быстро (за 10...15 шагов итерации) благодаря хорошей точности аппроксимации объекта.

Результаты испытания АдСУ дают основания предполагать, что ее можно успешно использовать для управления современными ТП в разных отраслях народного хозяйства, а также в информационных системах в экономике, медицине и т.д. В настоящий момент система проходит апробацию на ТЭЦ №25 филиала АО "Мосэнерго" (Москва) для управления выработкой оптимальной мощности парогенераторов.

Список литературы

1. *Методы классической и современной теории автоматического управления*. Учебник в 3-х т. Т. 3: Методы современной теории автоматического управления/Под. ред. Н.Д. Егутова. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000.
2. *Дисперсионная идентификация*/Под ред. Н.С. Райбмана. М.: Наука, 1981.
3. *Болквядзе Г.Р.* Идентификация нелинейных стохастических объектов Гаммерштейна // *АиТ*. 2002. № 4.
4. *Степаняни С.Л.* Автоматизация технологических процессов ферросплавного производства. М.: Металлургия, 1982.

Компания Фиорд представила новую разработку фирмы Eurotech CPU-1450 — процессорный модуль PC/104 Plus, который предназначен для использования в высокопроизводительных встраиваемых приложениях: наблюдение за движением транспорта (ITS), видео мониторинг (DVR), автомобильные системы (AVL/AVM), модули обработки данных в сложных распределенных системах (видео-серверы, мультимедиа-устройства, промышленные широкополосные коммуникационные устройства и т.п.).

CPU-1450 представляет собой встраиваемое устройство, состоящее из двух частей: мезонинный модуль CPU и плата-носитель для этого мезонина в формате PC/104 Plus.

Мезонинный модуль CPU оснащен чипсетом Intel® 815E (макс. частота на шине 133МГц) и использует ультра-низкопотребляющие процессоры (ULV BGA) Celeron 400МГц или Pentium® III 800МГц с кэшем 256Кб L2.

Здесь же размещаются чипы динамического ОЗУ 256 Мб (пайка). Обе версии изделия (Celeron/Pentium III) не требуют активных элементов охлаждения для работы как в стандартном, так и в промышленном диапазоне температур, благодаря специально разработанному Eurotech плоскому радиатору охлаждения для

Процессорный модуль CPU-1450 компании Eurotech

CPU. Плата-носитель мезонинного модуля CPU оснащена всеми необходимыми разъемами для подключения внешней периферии: 4 USB, Fast Ethernet, 2 последовательных порта, параллельный порт, флоппи, SVGA, аудио, клавиатура, мышь, IDE и, естественно, шины ISA и PCI (PC/104 Plus), что позволит легко интегрировать CPU-1450 со стандартными изделиями. Так же, Eurotech заявляет о возможности изготовления специальных версий платы-носителя CPU по требованиям заказчиков.

Встроенный BIOS, традиционно для всех изделий Eurotech, размещен в Flash EPROM 1Мб и перепрограммируется непосредственно ("onboard"), установленные параметры хранятся во флэш-памяти, что позволяет работать модулю без батареек.

Также как и все другие изделия Eurotech, CPU-1450 разработан с учетом требований "жестких" условий эксплуатации: высокая устойчивость к вибрации, ударам, влажности, функционирование при повышенных и пониженных температурах без вентилятора.

CPU-1450 поддерживается стандартными для обычной PC-платформы ОС — Windows 95/98/XP/NT/2000/CE®, VxWorks®, Linux®, ROM-DOS, QNX®.

Контактный телефон (812) 323-62-53.