УДК 658.51

РЕКУРРЕНТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

М.В. Жиров
Московский государственный университет пищевых производств
Россия, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, д.11
E-mail: mgutu-vino@mail.ru

В.В. Макаров
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: makfone@mail.ru

Ключевые слова: рекуррентная идентификация, адаптивное управление, нестационарные объекты, математическая модель, разностные уравнения.

Аннотация: Для адаптивного управления нестационарными объектами (на примере реальных технологических процессов) необходимо иметь математическую модель объекта, способную работать в реальном масштабе времени и адаптивно корректироваться в зависимости от изменения свойств объекта. Вычисление параметров такой модели, в реальном масштабе времени должно производиться таким образом, чтобы обработка измерений на каждом шаге завершалась до начала следующего шага. Важной причиной использования рекуррентной идентификации, на практике, является то, что свойства нестационарных объектов могут изменяться со временем, и алгоритмы идентификации должны отслеживать эти изменения. Это можно достичь путем назначения меньших весов более старым измерениям, которые менее информативны

1. Введение

Наряду с аддитивными возмущениями, влияющими на состояние системы управления, нередко присутствуют и мультипликативные возмущения, под действием которых изменяются параметры объекта управления (технологического процесса или производства) [1, 2].

Для эффективного парирования мультипликативных возмущающих воздействий наиболее предпочтительными являются системы адаптивного управления, обладающие способностью приспосабливаться к изменяющимся условиям работы [3]. Это достигается с помощью периодической перенастройки адаптивной системы, выполняемой автоматически и позволяющей своевременно учесть изменения ее параметров, и, следовательно, избежать снижения качества управления [4,5].

В процессе создания адаптивных систем приходится сталкиваться со следующими проблемами:

– управляемым технологическим процессам и производствам присущи сложные динамические закономерности, что весьма затрудняет выбор адекватных математических моделей для их описания;

– системам управления приходиться функционировать в сложных условиях, подвергаясь воздействию разнообразных случайных факторов (шумов в измерительных преобразователях, наводок в линиях связи, изменению температуры, влажности, давления и др. технологических параметров), иными словами, адаптивная система рассматривается в условиях стохастической неопределенности;

– информацию об изменении динамических характеристик системы управления желательно получать, не размыкая контура управления, в противном случае это привело бы к снижению качества управления и работоспособности системы;

– информация о статистических характеристиках возмущающих воздействий на систему управления полностью или частично отсутствует.

Для успешного решения указанных проблем целесообразно [3-13]:

– использовать параметрические математические модели, заданные в виде аналитических зависимостей и уравнений, при описании динамики управляемых технологических процессов и производств;

– использовать методы идентификации объекта, применимые при замкнутом и разомкнутом контурах управления.

2. Построение рекуррентных алгоритмов идентификации на базе МНК

Для адаптивного управления нестационарными объектами (на примере реальных технологических процессов) необходимо иметь математическую модель объекта, способную работать в реальном масштабе времени и адаптивно корректироваться в зависимости от изменения свойств объекта.

Вычисление параметров такой модели, в реальном масштабе времени должно производиться таким образом, чтобы обработка измерений на каждом шаге завершалась до начала следующего шага. Методы идентификации, удовлетворяющие этому требованию, называются рекуррентными [7-11]. Важной причиной использования рекуррентной идентификации, на практике, является то, что свойства нестационарных объектов могут изменяться со временем, и алгоритмы идентификации должны отслеживать эти изменения. Это можно достичь путем назначения меньших весов более старым измерениям, которые менее информативны.

Рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК) основан на минимизации взвешенного критерия (взвешенных средних потерь) [7]:

(1) $$S(y,K,\Phi,\beta,N)=\sum_{i=1}^{N_0}\beta(N,i)\left(y(i)-\Phi^T(i)K\right)^2,$$

где $\beta(N,i)=\lambda^{N-i}, 0<\lambda\le 1,$ задает последовательность весов таким образом, что старые измерения экспоненциально затухают. В этом случае λ можно назвать фактором забывания. В соответствии с (1):

(2) $$K(N)=\left(\sum_{i=1}^{N_0}\beta(N,i)\Phi(i)\Phi^T(i)\right)^{-1}\cdot\sum_{i=1}^{N_0}\beta(N,i)\Phi(i)y(i),$$

$$R_1(N)=\sum_{i=1}^{N_0}\beta(N,i)\Phi(i)\Phi^T(i),\quad F_1(N)=\sum_{i=1}^{N_0}\beta(N,i)\varphi(i)y(i).$$

Из (1) следует $\beta(N,i)=\lambda(N)\beta(N-1,i), 1\le i\le N-1$. Это означает, что $\beta(N,i)=\prod_{i+1}^{N}\lambda(j)$. При этом

$$R_1(N)=\lambda(N)R_1(N-1)+\Phi(N)\Phi^T(N),\ F_1(N)=\lambda(N)F_1(N-1)+\Phi(N)y(N).$$

Отсюда имеем:

(3) $$K(N)=K(N-1)+R_1^{-1}(N)\Phi(N)\left(y(N)-\Phi^T(N)K(N-1)\right),$$

(4) $$R_1(N)=\lambda(N)R_1(N-1)+\Phi(N)\Phi^T(N),$$

что и представляет собой рекуррентный алгоритм: в момент времени $N-1$ запоминается только конечномерный информационный вектор $(K(N-1),R_1(N-1))$.

Так как R_1 симметрична, размерность равна $d+d(d+1)/2$. В момент времени N этот вектор пересчитывается в соответствии с (3) и (4). Чтобы избежать обращения матрицы $R_1^{-1}(N)$ на каждом шаге, удобно ввести $P(N)=R_1^{-1}(N)$. Применяя к (4) лемму об обращении матриц получим:

$$R_1^{-1}(N)\Phi(N)=\frac{P(N-1)\Phi(N)}{\lambda(N)+\Phi^T(N)P(N-1)\Phi(N)}.$$

Таким образом, имеем следующую форму РМНК:

(5) $$K(N)=K(N-1)+L(N)\left(y(N)-\Phi^T(N)K(N-1)\right),$$

где

$$L(N)=\frac{P(N-1)\Phi(N)}{\lambda(N)+\Phi^T(N)P(N-1)\Phi(N)},$$

$$P(N)=\left(\frac{P(N-1)-\dfrac{P(N-1)\Phi(N)\Phi^T(N)P(N-1)}{\lambda(N)+\Phi^T(N)P(N-1)\Phi(N)}}{\lambda(N)}\right).$$

Выражение $y(N)-\Phi^T(N)K(N-1)$ представляет собой ошибку предсказания $e(N)$, тогда (5) можно записать в виде $K(N)=K(N-1)+L(N)e(N)$.

Заметим, что рекуррентные алгоритмы идентификации можно представить, в общем виде, следующим образом

(6) $$K(N)=K(N-1)+\gamma(N)e(N),$$

где $\gamma(N)$ – коэффициент усиления той или иной структуры.

Для различных процедур оценивания уравнение (6) остается одним и тем же, отличаются только векторы данных $\Phi(N)$ и матрицы коррекции $\gamma(N)$, а также способы их расчета. Чтобы, в нашем случае, воспользоваться рекуррентным алгоритмом РМНК, необходимо определить начальные условия. Правильными начальными условиями в (3), (4), в момент времени $N=0$, должны быть $R_1(0)=0$, $K(N)$ – произвольно, что соответствует определению R_1. Однако их нельзя использовать. Тогда можно начинать алгоритм в момент времени N_0, когда $R_1(N_0)$ становится обратимой (обычно $N_0\ge d$), и затем использовать

$$P^{-1}(N_0)=R_1(N_0)=\sum_{k=1}^{N_0}\beta(N_0,k)\Phi(k)\Phi^T(k),$$

$$K = P(N_0)\sum_{i=1}^{N_0}\beta(N_0,i)\Phi(i)y(i).$$

Более простая возможность состоит в использовании $P(0)=P_0$ и $K(0)=K_I$ в выражении (5). Это, в свою очередь, дает выражение

(7) $$K(N)=\left(\beta(N,0)P_0^{-1}+\sum_{k=1}^{N}\beta(N,k)\Phi(k)\Phi^T(k)\right)^{-1}\left(\beta(N,0)P_0^{-1}K_I+\sum_{i=1}^{N}\beta(N,k)\Phi(i)y(i)\right).$$

Очевидно, что если P_0 велико (например, $P_0=\alpha I$, I – единичная матрица размерности $d\times d$, $\alpha >> 1$) или велико N, то разница между (7) и (2) незначительна.

Для идентификации объекта по настраиваемой модели, имеющей структуру ARMAX, можно воспользоваться расширенным рекуррентным методом наименьших квадратов (РРМНК) [1].

Оценки параметров по РРМНК производятся с помощью формул аналогичных (5), с той лишь разницей, что

$$\Phi(N)=\left[-y(N-1)\ldots-y(N-m)\,u(N-1)\ldots u(N-n)\,v(N-1)\ldots v(N-l)\right]^T,$$

$$K=\left[a_1\ldots a_m\ b_1\ldots b_n\ c_1\ldots c_l\right]^T.$$

Для оценки случайного сигнала v, значения которого являются компонентами вектора $\varphi(N)$, применяется соотношение $\hat{v}(N)=e(N)=y(N)-\Phi^T(N)K(N-1)$.

На начальном этапе вычислений, из-за отсутствия точных значений $\hat{v}(N)=e(N)$, оценки сходятся весьма медленно. РРМНК применим при более высоких отношениях шума к полезному сигналу.

Результатом идентификации нестационарного объекта, с помощью РМНК в режиме «ON-LINE», (на основе обработки экспериментальных данных процесса термообработки технологических жидкостей), является получение оценок параметров (коэффициентов) адаптивной прогнозирующей модели, в качестве которой используется разностное уравнение второго порядка.

Вычисления значений коэффициентов модели производятся на каждом шаге сбора данных ($N = t/T_0$, где: N – номер шага сбора данных; t – текущее время в секундах; T_0 – интервал квантования).

В результате экспериментальных исследований, были получены математические модели, описывающие процесс термообработки технологических жидкостей. Для жидкости № 1 имеем следующее разностное уравнение:

(8) $$y(N)=1.9554\cdot y(N-1)-0.9555\cdot y(N-2)+0.1453\cdot u(N-1)-0.1008\cdot u(N-2).$$

Значения коэффициентов разностного уравнения (8), вычисляемые с помощью РМНК в режиме «ON-LINE» для термообработки технологической жидкости № 1, представлены на рис. 1.

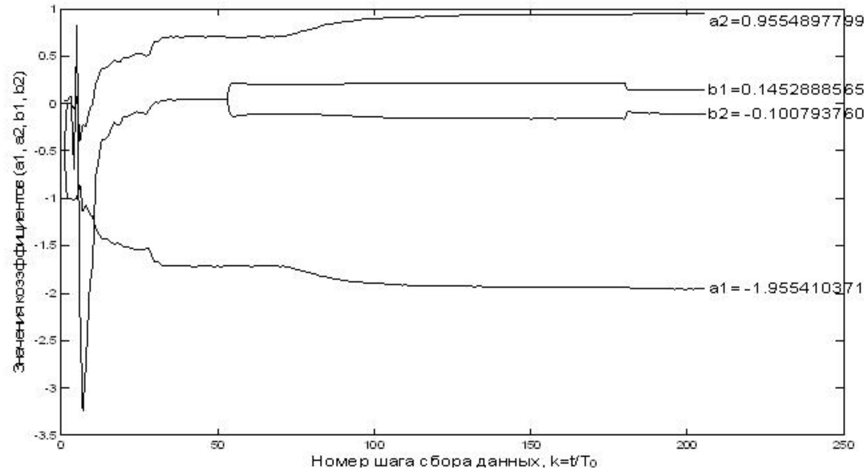

Рис. 1. Значения коэффициентов разностного уравнения (9) вычисляемые с помощью РМНК в режиме «ON-LINE» (термообработка технологической жидкости 1).

3. Заключение

Анализ математических моделей, представленных разностными уравнениями, в этой работе уравнение (8), показывает на существенное различие коэффициентов a_1, a_2 в авторегрессионной части уравнений (во втором знаке после запятой) и не существенное различие коэффициентов b_1, b_2 в регрессионной части уравнений (в первом знаке после запятой). Данный результат исследований позволяет модифицировать (существенно упростить) процедуру идентификации нестационарных коэффициентов объекта в адаптивной системе с идентификатором (АСИ), сводя ее только к оценке нестационарных коэффициентов авторегрессионной части уравнений модели (8), то есть коэффициентов $a_1(N)$, $a_2(N)$,…, $a_n(N)$ при измеряемых входах $u_1(N)$, $u_2(N)$,…, $u_n(N)$.

Математическая модель нестационарного объекта управления, представляющая собой разностное уравнение второго порядка (коэффициенты которого вычисляются в режиме «ON-LINE» в процессе идентификации с использованием РМНК), применяется в качестве адаптивной прогнозирующей модели. С этой целью она была реализована в функциональном блоке «C-Icon» программной среды Build-Time (пакет прикладных программ Labtech Control) в виде программно-имитационной модели, которая корректируется в реальном времени (в соответствии с вышеописанной процедурой идентификации).

Список литературы

1. Жиров М.В., Макаров В.В., Солдатов В.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 203 с.
2. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Идентификация при коррелированных входах // Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO ‹04. Москва, 28-30 января 2004 г.. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004.
3. Бунич А.Л., Бахтадзе Н.Н. Синтез и применение дискретных систем управления с идентификатором / Отв. редактор Лотоцкий В.А. М.: Наука. 2003. 232 с.
4. Салихов З.Г., Гинсберг К.С. Исследование эволюции в области идентификации математических моделей металлургических процессов при создании реальных систем автоматического управления // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 105-112.

5. Гинсберг К.С., Генкин А.Л. К основам научной методологии структурной идентификации для цели создания реальных систем автоматического управления с требуемыми свойствами // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 3 (84). С. 24-30.
6. Гетманов В.Г., Жиров М.В., Шаховской А.В. Алгоритм идентификации для линейной дискретной динамической системы управления // Автоматика и телемеханика. 2001. № 4. С. 27-34.
7. Гетманов В.Г., Жиров М.В., Шаховской А.В. Идентификационный контроль теплофизических параметров и управление температурными полями инерционных тепловых объектов // Контроль. Диагностика. 2000. № 5. С. 22-26.
8. Лотоцкий В.А. Идентификация структур и параметров систем управления // Измерения, контроль, автоматизация. 1991. № 3. С. 30-38.
9. Льюнг Л. Идентификация систем: Теория для пользователя / Пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. 432с.
10. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Учебник. Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-ое, стереотипное. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 744 с.
11. Райбман Н.С., Чадеев В.М. О концепции адаптивных систем управления с идентификатором // Автоматика и телемеханика. 1982. № 3. С. 54-60.
12. Цыпкин Я.З. Идентификация нестационарных динамических систем // Автоматика. 1986. № 2. С. 3-9.
13. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. М.: 1995. 344 с.