© «Вестник ИГЭУ» Вып. 4 2007 г.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ ПРИ КОСВЕННОМ ИЗМЕРЕНИИ ВЕКТОРА ЕГО КООРДИНАТ СОСТОЯНИЯ

КОНДРАШИН А.В., канд. техн. наук

Рассматривается постановка задач оптимальной фильтрации процессов и оптимального управления в условиях косвенного измерения вектора состояния объекта, учитывающего динамические особенности, наличие случайных возмущений и зашумленность измерительной системы.

Ключевые слова: управление технологическим объектом, косвенное управление, оптимизация, оптимальная фильтрация.

OPTIMUM INDUSTRIAL OBJECT CONTROL UNDER ITS STATE COMPONENTS VECTOR INDIRECT DETERMINATION

A.V. KONDRASHIN, Ph.D.

The work represents the aims of process optimum filtering and control provided object state vector indirect determination, which allows for character, random disturbance presence, and noise pollution of measuring system.

Key words: industrial object control, indirect control, optimization, optimum filtering.

Для многих технологических процессов характерны условия, затрудняющие получение информации об управляемых параметрах с помощью прямых измерений. Большинству средств измерений свойственны значительные динамические ошибки и зашумленность. В частности, в теплоэнергетике это касается измерения температуры потоков воды и пара, а также величины избытка воздуха в топке котла. А о таком важном технологическом параметре, как расход пылеугольного топлива, вообще крайне затруднительно получить достоверную информацию [1]. В этом случае приходится прибегать к терминологии и методам косвенного измерения.

Введение в задачи косвенного измерения и косвенного управления уже рассматривались ранее [2]. В их развитие были предложены и практически применены методы параметрической оптимизации автоматических систем регулирования, учитывающие специфику косвенных измерений и ориентированные на описание динамики в классе моделей «вход-выход».

Сущность косвенного управления можно показать на схеме автоматического регулирования (АСР), одноконтурный вариант которой представлен на рис. 1. В ней $W_О$, $W_И$, $W_Р$ соответствуют моделям объекта, информационной системы (косвенного измерения) и регулятора. Система работает в условиях действия неконтролируемых эквивалентных возмущений λ, приведенных к объекту, и информационного шума α. Двойными линиями показаны параметрические воздействия, характерные для процесса оптимизации АСР в процессе ее проектирования и наладки. Специфика косвенного управления связана с тем, что регулятор получает информацию не об истинной ошибке управления

$$\varepsilon = y_0 - y,$$

а об ее оценке

$$\tilde{\varepsilon} = y_0 - \tilde{y},$$

отличающейся наличием информационного шума α и динамической ошибки измерения

$$\varepsilon_д = y - \bar{y}.$$

Так что в условиях некоррелированности составляющих

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon + \left(\varepsilon_д + \bar{\alpha}\right) = \varepsilon + \varepsilon_И.$$

Подобное обстоятельство может существенно повлиять на условия параметрической оптимальности регулятора (на вектор параметров $\theta_Р$) [2]. Следует подчеркнуть, что в теплоэнергетике в качестве результатов косвенного измерения могут применяться сигналы, получаемые от коррелированных или функционально связанных с управляемыми дополнительных технологических параметров. В качестве примера можно сослаться на известные сигналы «по теплоте» и «по тепловосприятию» [3], позволяющие получить косвенную оценку расхода пылеугольного топлива.

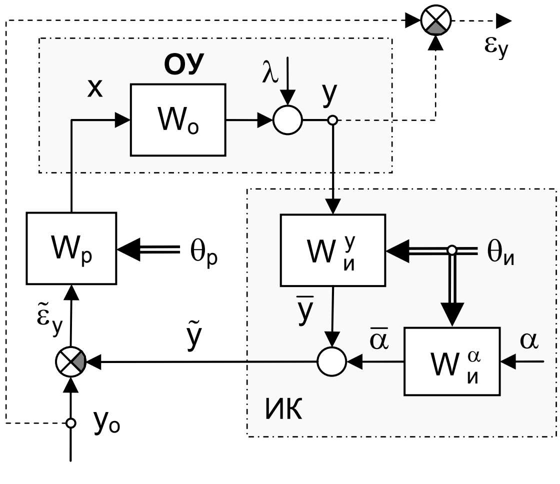

Рис. 1. Схема задачи параметрической оптимизации системы косвенного управления в терминах моделей типа «вход-выход»

Однако в таких случаях задача оптимизации существенно усложняется, так как требует совместной параметрической оптимизации не только регулятора $W_Р$, но также объекта управления $W_О$ и измерительного канала $W_И$. При этом следует иметь в виду, что в самом ИК можно выделить два параметрически связанных компонента $W_И^у$ и $W_И^\alpha$, формирующих динамическую $\varepsilon_д$ и флуктуационную $\bar{\alpha}$ ошибки, соответственно (на рис. 1 это отражено общим вектором параметров $\theta_И$).

В практической постановке задача оптимизации такой системы косвенного управления обычно формулируется в виде, ориентированном на достижение минимума дисперсии ошибки управления:

$$\left(\sigma^2_{\varepsilon_y}\right)^* = \min_{\theta_р,\theta_и} \sigma^2_\varepsilon\left(\theta_р,\theta_о,\theta_и,\theta_\lambda,\theta_\alpha\right).$$

Для декомпозиции общей задачи возможно применение теории оптимального управления по Винеру и теории информации [2]:

• на первом шаге предложено решить задачу оптимизации $W_И$

$$\left(\sigma^2_{\varepsilon_и}\right)^* = \min_{\theta_и} \sigma^2_{\varepsilon_и}\left(\theta_и,\theta_\lambda,\theta_\alpha\right);$$

• второй шаг связан с оптимизацией регулятора

$$\left(\sigma^2_{\varepsilon}\right)^* = \min_{\theta_р} \sigma^2_\varepsilon\left(\theta_р,\theta_о,\theta_и^*,\theta_\lambda,\theta_\alpha\right).$$

Попытка перейти к управлению на основе методов, использующих модели в пространстве состояний, и решить задачи оптимальной фильтрации и управления по Калману [4] оказалась преждевременной, так как не могла быть реализована на доступных по тем временам технических средствах. Современные вычислительные ресурсы снимают ограничение по реализуемости. Открывается возможность возобновления попыток повышения эффективности управления за счет применения эффективных алгоритмических решений.

Формальное применение метода пространства состояний к задаче косвенного управления приводит к последовательно включенным моделям ОУ и ИК (рис. 2), описываемым системами уравнений:

$$\begin{cases}\mathbf{z}_{k+1} = A_о\,\mathbf{z}_k + B_о\,\mathbf{x}_k, \\ y_k = C_о\,\mathbf{z}_k + D_о\,\mathbf{x}_k + \lambda_k,\end{cases}$$

$$\begin{cases}\bar{\mathbf{z}}_{k+1} = A_и\,\bar{\mathbf{z}}_k + B_и\,y_k, \\ \tilde{y}_k = C_и\,\bar{\mathbf{z}}_k + D_и\,y_k + \bar{\alpha}_k.\end{cases}$$

Особенность задачи косвенного управления, связанная с явным разделением векторов состояния ОУ z_k и ИК $\bar{\mathbf{z}}_k$, не позволяет осуществить эффективное наблюдение за поведением координат состояния объекта z_k. Для устранения этого затруднения переформулируем задачу, используя следующую модель взаимодействия переменных:

$$\mathbf{z}_{k+1} = A_о\,\mathbf{z}_k + B_о\,\mathbf{x}_k + \hat{\lambda}_k;$$

$$\bar{\mathbf{z}}_{k+1} = \bar{A}_и\,\bar{\mathbf{z}}_k + \bar{B}_и\,\mathbf{z}_k + \bar{D}_и\,\mathbf{x}_k;$$

$$\tilde{y}_k = \bar{C}_и\,\bar{\mathbf{z}}_k + \bar{\alpha}_k.$$

Принципиальным отличием этой версии модели является отсутствие уравнения для ненаблюдаемого вектора объекта управления $\mathbf{y}_k$. Связь уравнений ОУ и ИК осуществлена на уровне своих координат состояния (рис. 3). В случае равенства размеров векторов z_k и $\bar{\mathbf{z}}_k$ матрица связи $\bar{B}_и$ может быть единичной диагональной.

Приведенная схема отражает место наблюдателя состояния, восстанавливающего информацию о свойствах эквивалентного возмущения в ОУ и информационного шума в ИК с помощью корректирующих матриц $\mathbf{N_1}$ и $\mathbf{N_2}$. Искомый вектор прогноза состояния процесса $\hat{\bar{\mathbf{z}}}_k$ используется в качестве входной информации для матричного регулятора **W**, формирующего управляющее воздействие $\mathbf{x}_k$. Используемый в обозначениях переменных индекс «k» является цифровым аналогом времени и определяет номер текущего расчетного такта.

Задача оптимальной фильтрации в условиях косвенных измерений была сформулирована и решена в [4]. Здесь же мы ограничимся перечислением характерных допущений (условий) и основных алгоритмов. Начнем с допущений:

1. Все матрицы **A**, **B**, **C**, **D** считаем известными. В общем случае они могут быть нестационарными.

2. Векторы эквивалентного возмущения в объекте и шума в измерительном канале имеют нормальные законы распределения с нулевыми математическими ожиданиями и априорно известными ковариационными матрицами соответствующих случайных процессов:

$$\hat{\lambda}_k \sim N\left(0,\mathbf{Q}_k\right);$$

$$\bar{\alpha}_k \sim N\left(0,\mathbf{R}_k\right).$$

3. Начальное состояние системы (k = 0) определено также нормальным законом с известной оценкой математического ожидания и известной ковариационной матрицей

$$\mathbf{z}_0 \sim N\left(\hat{\mathbf{z}}_0,\mathbf{P}_0\right).$$

Для определения свойств корректирующих матриц наблюдателя $\mathbf{N_1}$ и $\mathbf{N_2}$ необходимо использовать матричные соотношения

$$N_{1,k} = A_о\left(P_{\mathbf{z}\bar{\mathbf{z}}}\right)_k^{k-1}\bar{C}_и^т\left[\bar{C}_и\left(P_{\bar{\mathbf{z}}}\right)_k^{k-1}\bar{C}_и^т + R_k\right]^{-1},$$

$$N_{2,k} = \left[\bar{B}_и\left(P_{\mathbf{z}\bar{\mathbf{z}}}\right)_k^{k-1} + A_и\left(P_{\bar{\mathbf{z}}}\right)_k^{k-1}\right]\bar{C}_и^т\left[\bar{C}_и\left(P_{\bar{\mathbf{z}}}\right)_k^{k-1}\bar{C}_и^т + R_k\right]^{-1},$$

в которых априорные оценки ковариационных матриц $\mathbf{P}_{\mathbf{z}\bar{\mathbf{z}}}$ и $\mathbf{P}_{\bar{\mathbf{z}}}$, соответствующих k-му шагу, находятся с помощью уравнений Риккати по информации, полученной на (k–1)-м шаге [4].

В соответствии с принципом двойственности Калмана, решение задачи синтеза наблюдателя вектора состояния процесса в объекте открывает путь к постановке и решению *задачи оптимального управления*.

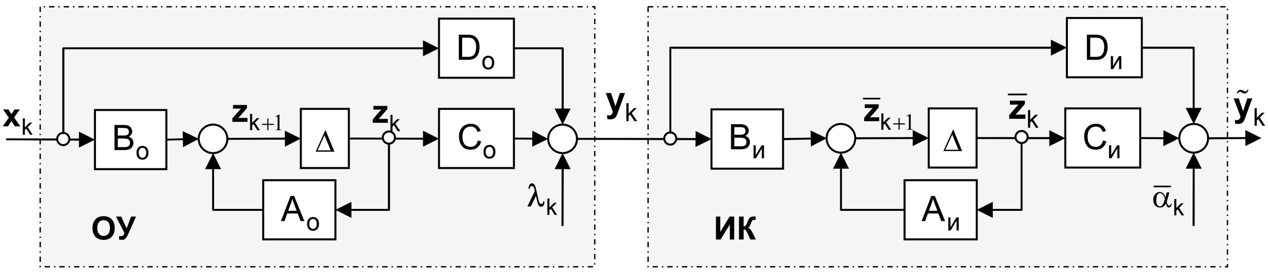

Рис. 2. Исходная схема моделей ОУ и ИК в пространстве состояний

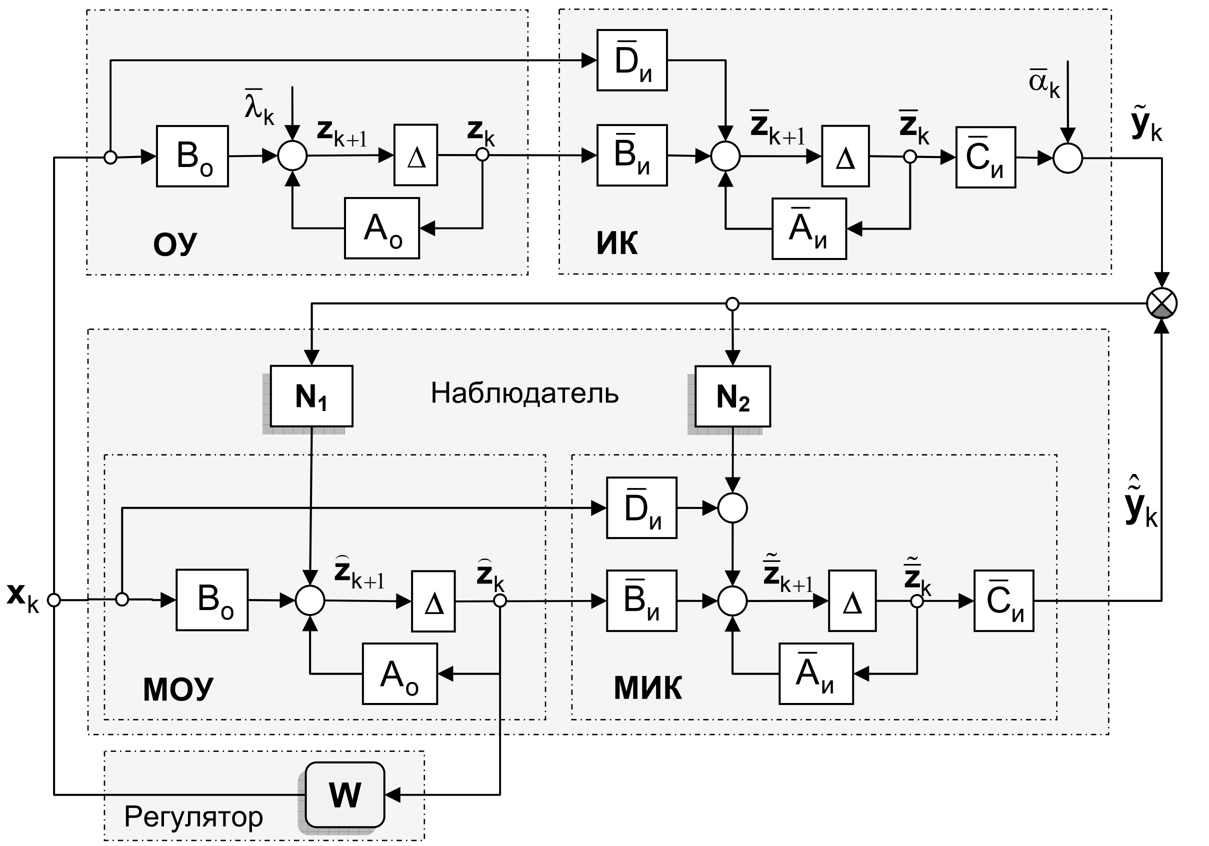

Рис. 3. Схема оптимальной системы косвенного управления с наблюдателем и регулятором состояния

Никакой специфики в постановке этой задачи нет, так как контур управления включает в себя традиционную модель ОУ и регулятор, получающий прогнозные оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{z}}_k$. Поэтому для формирования матрицы оптимального регулятора **W** можно применять известные алгоритмы [5, 6].

Список литературы

1. **Плетнев Г.П., Кондрашин А.В., Бабкин Н.Н., Сафонов В.М.** Исследование некоторых видов сигнала по расходу угольной пыли // Теплоэнергетика. – 1971. – № 12.

2. **Кондрашин А.В.** Принципы проектирования автоматических систем регулирования для теплоэнергетических объектов: Учеб. пособие. – Иваново: ИЭИ, 1975.

3. **Кондрашин А.В.** Технологические основы управления теплоэнергетическими процессами. – М.: ИСПО-Сервис, 2004.

4. **Кондрашин А.В.** Алгоритмы оптимальной фильтрации в задачах косвенного измерения параметров состояния технологических процессов / Повышение экономичности и надежности тепловых электростанций: Сб. науч. тр. – Иваново: ИвГУ, 1978. – С. 132–137.

5. **Изерман Р.** Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984.

6. **Стрейц В.** Метод пространства состояний в теории линейных дискретных систем управления. – М.: Наука, 1985.

Кондрашин Анатолий Васильевич
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов,
телефон (4932) 26-99-09,
e-mail: tvd@atp.ispu.ru