

ПРЕДСКАЗАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ДОБЫЧНЫХ УЧАСТКОВ ШАХТ

А. А. Волков, А. Н. Гвоздинский, Т. Г. Терехова

Харьков

При построении систем управления с компенсацией возмущений важно знать не только текущие, но и будущие их значения, так как это дает возможность строить систему с так называемой «опережающей компенсацией» возмущений.

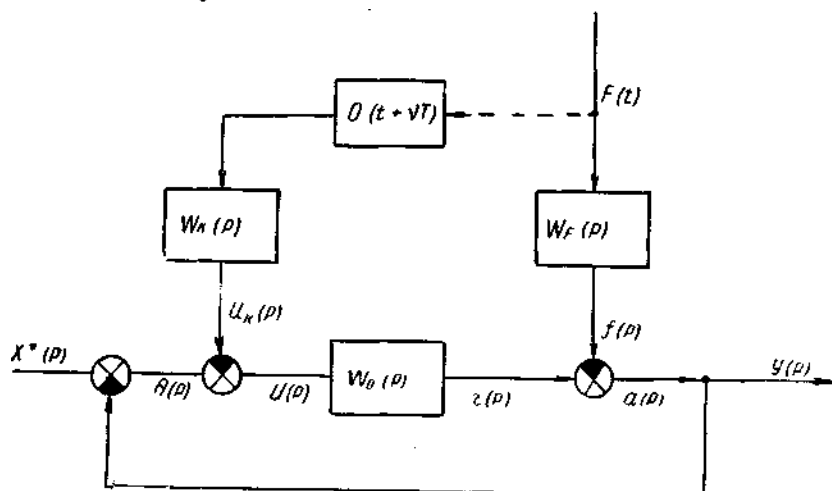


Рис. 1.

Поэтому при построении систем управления проветриванием добычных участков шахт с коррекцией по возмущению, вносимому работой комбайна, значительный интерес представляет выбор алгоритма предсказания возмущений.

В рассматриваемой системе (рис. 1) объектом управления является добычной участок как объект проветривания, а основным возмущением, приложенным к выходу объекта — работа добычного комбайна. Выходным параметром системы является концентрация метана α , изменения которой во времени случайны и представляют собой стационарный случайный процесс $\alpha(t)$ с корреляционной функцией вида

$$R_{\alpha\alpha}(\tau) = D_{\alpha}e^{-a|\tau|}.$$

Возмущение, приложенное к выходу объекта, также случайно и является стационарным случайным процессом $F(t)$ с корреляционной функцией вида

$$R_{FF}(\tau) = D_F e^{-2\beta_0|\tau|}.$$

Стационарность этих процессов справедлива при рассмотрении их на бесконечном интервале времени наблюдения. Переход к последнему как правило, связан с пренебрежением переходными процессами. Но в рассматриваемой системе переходными процессами, вызванными работой комбайна, пренебречь нельзя. Именно этот вид возмущений вызывает значительное увеличение концентрации метана в исходящей струе. При учете переходных процессов мы приходим к неустойчившимся случайным процессам. Как известно [1], математическое ожидание неустойчившегося случайного процесса равно произведению математического ожидания случайного воздействия на переходную функцию системы. Передаточная функция добычного участка как объекта управления, по отношению к возмущающему воздействию F , действующему на его выход, [2]

$$W_F(p) = \frac{k}{T_0 p + 1}. \quad (1)$$

Тогда изменение концентрации метана, вызванное работой комбайна, выражается следующей формулой:

$$\Delta m_a(t) = k m_a \left(1 - e^{-\frac{t - T_{\text{пв}}}{T_0}} \right), \quad (2)$$

где $m_a = \text{const}$ — математическое ожидание процесса при $t = -\infty$;

T_0 — постоянная времени;

$T_{\text{пв}}$ — продолжительность непрерывной работы комбайна.

Из выражения (2) следует, что величина возмущения Δm_a определяется длительностью непрерывной работы комбайна в переходном режиме, т. е. при $T_{\text{пв}} \leq T_0$.

Значение концентрации метана в переходном режиме, согласно работе [3], можно выразить в виде

$$a(t) = r(t) + f(t), \quad (3)$$

где $r(t)$ — стационарная составляющая процесса;

$f(t) = \Delta m_a(t)$ — нестационарная составляющая, представляющая собой детерминированную функцию времени при $k = \text{const}$.

Нашей задачей является выбор алгоритма предсказания значения Δm_a . Но в физической системе этот параметр непосредственно не измеряется, а измеряются в дискретные моменты времени реализации процессов $T_{\text{пв}}(t)$ и $a(t)$. Стационарную составляющую $r(t)$ можно определить по реализациям $a(t)$ в моменты стоянки комбайна, т. е. $r(t)$ фактически тоже измеряется. В результате статистической обработки временных диаграмм работы комбайна по данным многосуточного наблюдения на одной из шахт Донбасса установлено, что длительности работы комбайна случайны и их изменения во времени можно рассматривать как стационарный случайный процесс $T_{\text{пв}}(t)$ с $R_{xx}(\tau) = D_x e^{-\alpha|\tau|}$.

Отсюда следует, что будущие значения $T_{\text{пв}}$ можно определить, пользуясь теорией статистического упреждения стационарных случайных процессов. Упрежденное значение Δm_a мы можем вычислить непосредственно по формуле (2), определив предварительно величину $T_{\text{пв}}$, или путем решения задачи оптимальной оценки процесса $a(t)$ с конечным временем наблюдения.

При использовании для вычисления Δm_a измеряемых реализаций процесса $a(t)$ мы решаем задачу чистой фильтрации при ограниченном времени наблюдения [3]. Выделив полезную составляющую, которая является детерминированной функцией времени $f(t)$, производим ее экстраполяцию на время, обеспечивающее заданную точность.

Пользуясь методикой, предложенной в работе [3], определим весовую функцию оптимального фильтра. Согласно выражению (3), входным сигналом фильтра является процесс изменения концентрации метана $a(t)$, представляющий собой сумму стационарного процесса $r(t)$ и нестационарной детерминированной функции времени $f(t)$. Сигнал $a(t)$ измеряется дискретно во времени с периодом T (при $t = 0, T, 2T, \dots, NT$). Задача системы — приближение выходного сигнала $y(kT)$ в дискретные моменты времени к некоторому желаемому процессу $U(kT)$. Последний образуется в результате преобразования некоторым желаемым оператором $D(p)$ полезного сигнала $f(t)$, т. е.

$$U(kT) = D(p)f(t). \quad (4)$$

Обычно $D(p)$ стационарен и имеет весовую функцию $W(kT)$. Тогда, обозначив $f(kT) = bP(kT)$, запишем

$$U(iT) = b \sum_{j=0}^N W(jT) P(iT - jT) = Bq(iT). \quad (5)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N$$

Ошибка преобразования $e(jT)$ определяется как разность между желаемым и выходным сигналами

$$e(jT) = u(jT) - y(jT). \quad (6)$$

Обозначив через $h(N, j)$ весовую функцию оптимального дискретного фильтра, получим

$$y(NT) = \sum_{j=0}^N h(N, j) a(jT). \quad (7)$$

Оптимальное значение $h(N, j)$ выводится из условия минимума дисперсии ошибки $D_e(N)$.

Необходимое условие минимума —

$$\frac{\partial D_e(N)}{\partial h(N, j)} = 0 \quad (8)$$

— является также и достаточным в силу положительной знакоспделенности $D_e(N)$.

Вводя в равенство (8) соотношения (5), (6), (7) и производя операцию осреднения по ансамблю, получим систему $(N+1)$ уравнений оптимального фильтра

$$\sum_{i=0}^N R_{rr}(jT - iT) h(N, j) + b^2 P(iT) \left[\sum_{j=0}^N h(N, j) P(jT) - q(NT) \right] = 0. \quad (9)$$

Следует отметить, что при небольших значениях времени наблюдения N система (9) может быть решена известными методами. Однако непосредственное решение уравнений (9) при большом N связано со значительными трудностями при вычислении. Этот недостаток устраняется, если выражение (9) свести к одному разностному уравнению. Для этого коэффициенты системы уравнений (9), представляющие собой корреляционные функции стационарной составляющей, нужно выразить при помощи известной формулы обращения через дискретные спектральные плотности $\Phi_{rr}(z)$:

$$R_{rr}(jT - iT) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{\Gamma} \Phi_{rr}(z) z^{i-j} \frac{dz}{z}, \quad (10)$$

где контуром интегрирования является окружность Γ единичного радиуса плоскости z с центром в начале координат.

$R_{aa}(\tau) = D_a e^{-aT|\tau|}$ выражается через $\Phi_{rr}(z)$ следующим образом:

$$\Phi_{rr}(z) = \frac{D_a^2 (1 - d^2)}{(1 - dz)(1 - dz^{-1})} = \frac{A_{11}(z)}{B_{11}(z)}, \quad (11)$$

где $d = e^{-aT}$;

$A_{11}(z)$ и $B_{11}(z)$ — числитель и знаменатель рациональной функции $\Phi_{rr}(z)$; z — дискретный оператор Лапласа.

Воспользовавшись оператором опережения $\xi = e^{LT}$, сформируем линейный оператор $B_{11}(\xi) = (1 - d\xi)(1 - d\xi^{-1})$. Применив $B_{11}(\xi)$ к системе (9) по переменной i и производя соответствующие преобразования, получим разностное уравнение для $i = \beta, \beta + 1, \dots, N - \beta - 1, N - \beta$:

$$A_{11}(\xi) h(N, i) = B_{11}(\xi) [-P(iT) Y_k], \quad (12)$$

где $A_{11}(\xi) = D_a^2 (1 - d^2)$;

$$Y_k = b^2 \left[\sum_{j=0}^N h(N, j) P(jT) - q(NT) \right], \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N);$$

β — показатель степени полинома $B_{11}(z)$.

Весовую функцию оптимального фильтра $h(N, j)$ находим как решение системы уравнений (9) или как решение одного разностного уравнения (12). Ввиду громоздкости выражение для $h(N, j)$ здесь не приводится.

Рассмотренный метод предсказания возмущений методом оптимальной оценки процесса $a(t)$ с последующей экстраполяцией детерминированного полезного сигнала является трудоемким для практической реализации процессом и недостаточно точным ввиду того, что шаг упреждения νT полезного сигнала $f(t)$ может значительно отличаться от истинного значения $T_{\text{пв}}$.

Наиболее точным и простым является способ предсказания Δm_a , в котором осуществляется непосредственный прогноз $T_{\text{пв}}$. Точность этого метода будет зависеть в основном от точности предсказания $T_{\text{пв}}$.

Так как процесс $T_{\text{пв}}(t)$ представляет собой стационарную случайную последовательность, то наиболее приемлемым способом экстраполяции ее является метод и формула А. Н. Колмогорова [4]. Согласно этому методу, задача линейного экстраполирования стационарной последовательности заключается в подборе при заданных $n > 0$ и $\nu T > 0$ таких действительных коэффициентов C_i , при которых линейная комбинация

$$O[x(t)] = C_1 x(t-1) + C_2 x(t-2) + \dots + C_n x(t-n) \quad (13)$$

случайных величин $x(t-1), x(t-2) \dots$ давала бы наилучшее приближение к случайной величине $x(t + \nu T)$. Здесь $T_{\text{пв}}(t)$ обозначен через $x(t)$.

В качестве меры точности принят критерий минимума среднеквадратичной ошибки экстраполяции, т. е.

$$\bar{\epsilon}_s^2 = M \{x(t + \nu T) - O[x(t)]\}^2 = \bar{\epsilon}_{\text{min}}^2. \quad (14)$$

По известным значениям $x(t)$ за некоторый промежуток времени, предшествующий моменту t , значения $x(t)$ в некоторый будущий момент времени определяются следующим выражением:

$$x(t + \nu T) = \sum_{i=1}^N C_i x_i = O[x(t)]. \quad (15)$$

Значения коэффициентов C_i , при которых выполняется условие (14), называются оптимальными, а оператор (15) при $C_{i \text{ opt}}$ считается обученным будущим значениям данной случайной последовательности. Алго-

ритм обучения оператора предсказания, заключающийся в определении $C_{i \text{ opt}}$, по условию $\varepsilon^2 < \varepsilon_{\min}^2$, легко реализуем на ЭВМ [5]. Длину пред- истории N и шаг упреждения νT обычно находят из условия $\varepsilon_3^2 < \varepsilon_{\min}^2$. Рассматриваемый алгоритм согласно выражению (3), пригоден также и для предсказания суммарного значения концентрации метана $a(t)$ в начальный период работы комбайна.

Определив $T_{\text{пв}}$ и зная время t_1 от момента поступления информа- ции о будущем включении в работу комбайна до самого начала его

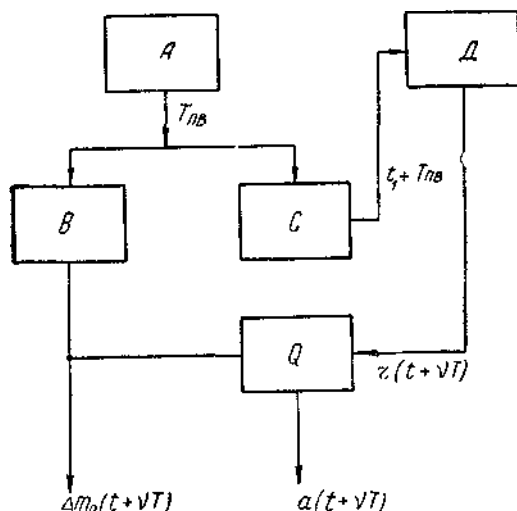


Рис. 2.

работы, мы сможем определить необходимое время упреждения $\nu T = t_1 + T_{\text{пв}}$ стационарной составляющей процесса $a(t)$. Опре- делив νT , по вышеописанному алгоритму определяется $r(t + \nu T)$. Затем, осуществляя опе- рацию согласно выражению (3), находим максимальное значение концентрации метана, которое будет достигнуто на добычном участке в результате работы комбайна.

Используя реализованный на ЭВМ в работе [5] алгоритм чистого прогноза стационарных последовательностей, запишем в формализованной форме алго- ритм работы подсказывающего фильтра:

$$A\alpha_1 \uparrow \uparrow \downarrow B\beta_1 \uparrow \uparrow \downarrow CD \downarrow Q, (16)$$

где A — оператор выдачи предсказанных значений;

α_1 — логическое условие, считающееся выполненным при $i = N$;

B — оператор вычисления Δm_a ;

B_1 — логическое условие, считающееся выполненным при $i = N$;

C — оператор суммирования t_1 и $T_{\text{пв}}$;

D — оператор выдачи предсказанных значений $r_{t+\nu T}$,

Q — оператор вычисления концентрации метана $a_{t+\nu T}$.

Описанный алгоритм был реализован на УЦВМ по данным, полу- ченным в результате одиннадцатисуточного наблюдения за метановыде- лением на одной из шахт Донбасса. На рис. 2 представлена блок-схема предсказывающего фильтра, реализующего алгоритм (16).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления, ч. 1. Изд-во «Советское радио», 1963.
2. А. А. Волков, В. П. Чуберкис. Определение газодинамических процес- сов добычного участка вероятностными методами. «Технология и экономика угледо- бычи», 1965, № 9.
3. В. Я. Катковник, Р. А. Полуэктов. Многомерные дискретные системы управления. Изд-во «Наука», 1966.
4. А. Н. Колмогоров. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. Изд-во АН СССР, «Серия матем. и естеств. наук», 1941, № 5.
5. А. Г. Ивахненко, В. Г. Лапа. Кибернетические предсказывающие уст- ройства. Изд-во «Техника», 1965.