УДК 681.5

Парсункин Б.Н., Обухов Г.Ф., Обухова Т. Г., Ахметова А.У.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО КОНТУРА ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В работе предоставлена математическая модель синтеза цифрового контура автоматического управления, программно реализованного с использованием ограниченного объема используемой оперативной памяти микропроцессорного регулирующего контроллера (МРК).

Ключевые слова: типовой закон управления, сигнал рассогласования, дискрентые аналоги производных, предыстория управления, управляющее воздействие.

Современные универсальные программно-конфигурируемые системы централизованного автоматизированного управления производственными процессами по экономическим условиям часто просто недоступны для специализированных предприятий отечественного малого и среднего бизнеса.

Обеспечение конкурентности и внешней импортной независимости производимой специализированными малыми предприятиями продукции возможно при использовании малозатратных объектно-ориентированных адаптивных свободно программируемых систем централизованного управления технологическими процессами.

В данной работе рассмотрен вариант эффективной программной малозатратной реализации типового стабилизирующего контура управления для централизованного процесса с использованием управляющего вычислительного комплекса (УВК) на базе микроЭВМ.

Уравнения типового ПИД-закона управления в аналоговой форме имеет вид:

$$Y(\tau) = Y_0 + K_р\left(E(\tau) + \left(1/T_{из}\right)\cdot\int_0^\tau E(\tau)d\tau + T_П\, dE(\tau)/d\tau\right), \quad (1)$$

где $Y(\tau)$, Y_0 – соответственно текущее и начальное положение выходного вала исполнительного механизма (или регулирующего органа), % хода; $E(\tau) = X_з(\tau) - X(\tau)$ - сигнал рассогласования между текущими заданным $X_з(\tau)$ и действительным $X(\tau)$ значениями управляющего технологического параметра; τ - текущее время, с; $K_р, T_{из}, T_П$ – соответственно параметры динамической настройки стабилизирующего контура управления: коэффициент передачи, % хода/ед. рассогласования, время изодрома, с; время предварения, с.

Выражение (1) может быть представлено в общем случае в виде уравнения:

$$Y(\tau) = Y_0 + K_р\int_0^\tau\left[T_П\frac{d^2E(\tau)}{d\tau^2} + \frac{d\ E(\tau)}{d\tau} + \frac{E(\tau)}{T_{из}}\right]d\tau + K_p\left(E_0(\tau) + T_П\left(\frac{dE}{d\tau}\right)_0\right), \quad (2)$$

где $E_0(\tau)$ и $\left(\frac{dE(\tau)}{d\tau}\right)_0$ - соответственные значения параметров в начальный при τ =0 момент времени, если процесс не находится в установившимся состоянии.

Если при $\tau \le 0$ управляемый процесс находится в установившимся состоянии, то $E_0(\tau)$ и $\left(\frac{dE(\tau)}{d\tau}\right)_0$ равны нулю.

В системах автоматического управления технологическими параметрами используются исполнительные механизмы (ИМ) постоянной скорости. Положение выходного вала ИМ может быть в любой текущий момент времени определенно в соответствии с выражением

$$Y(\tau) = Y_0 + K_{им}\int_0^\tau S(\tau)dt, \quad (3)$$

где $S(\tau) \in$ {-1,0,1} – сигнум (знаковая) функция, определяющая текущее состояние ИМ: +1 – движение в направление увеличения $\mathrm{Y}(\tau)$, -1 – движение в направления уменьшения $\mathrm{Y}(\tau)$, 0 – остановка ИМ, т.е. $\mathrm{Y}(\tau) = \mathrm{const}$; $\mathrm{K}_{им}$ – реальная постоянная скорость исполнительного механизма по технической характеристике, %хода/с.

Принцип работы свободно программируемого стабилизирующего контура управления, при условии использования ИМ постоянной скорости, можно выразить соотношением

$$\delta(\tau) = (E_0(\tau) - T_П\cdot V_0) + \int_0^\tau\left[T_П\cdot W(\tau) + V(t) + \frac{1}{T_{из}}E(\tau) - C_{св}\cdot S(\tau)\right]dt, \quad (4)$$

где $\delta(\tau)$ – текущее значение функции ошибки реализации ПИД-закона управления; $V(\tau)$, $W(\tau)$ – текущие цифровые значения «реальных» величин соответственно первой и второй производных $E(\tau)$ по времени τ; $C_{св} = K_{им}/K_р$ – скорость связи реального контура управления.

Управляющий вычислительный комплекс должен так управлять ИМ во всех используемых контурах управления, чтобы функции ошибки $\delta_i(\tau)$ были минимальными (практически нулевыми).

Здесь $i = 10 \div 12$ – число используемых контуров в системе управления технологическим процессом.

В случае наиболее удобном для практической реализации можно потребовать от автоматической системы централизованного управления выполнения следующего условия по каждому контуру:

$$S_i(\tau) = \mathrm{Sign}\left[\delta i(\tau)\right]. \qquad (5)$$

Рассматриваемый метод программной реализации цифрового типового (ПИД) закона управления в соответствии с (4), (5) возможно является не самым лучшим способом приближения к идеальному аналоговому закону, но практическая выгода от удобства ее реализации в производственных условиях очевидна, поскольку не требует использования процедуры цифроимпульсного преобразования при формировании управляющего сигнала.

Для предотвращения возможного возникновения автоколебательного режима переключение управляющего воздействия $S(\tau)$ по условию (5) осуществляется с учетом зоны нечувствительности δ^*_1 и гистерезиса δ^*_2 в соответствии с условием:

$$S(\tau) = \begin{matrix} +1, \text{ при } \delta(\tau) > \delta_1^*, \\ 0, \text{ при } \left|\delta(\tau)\right| \le \left|(\delta_1^* - \delta_2^*) + \delta_1^*\right|, \\ -1, \text{ при } \delta(\tau) < -\delta_1^*, \end{matrix} \qquad (6)$$

где δ_1^* – заданная величина зоны нечувствительности релейного элемента (данные хранятся в базе индивидуально для каждого *i*-го элемента контура управления); δ_i^* – заданная зона гистерезиса для *i*-го элемента контура управления.

Для перехода к цифровой (дискретной) форме представления преобразуем выражение (4), заменив интеграл суммой, а все аналоговые параметры дискретными:

$$\begin{gathered} \delta_i^* = E_0 + T_\Pi V_0 + \\ + \Delta\tau \sum_{k=1}^{i} T_\Pi W_k + V_k + \frac{1}{T_{\text{из}}} E_k - C_{\text{св}} S_k; \\ p \in (\delta_1, E, V, W, S)^i; \end{gathered} \qquad (7)$$

$$p \in p(\tau), \text{ при } \tau = K \cdot \Delta\tau_i; \; K = 0,1,2...i,$$

$\Delta\tau$ – принятый цикл работы управляющего вычислительного комплекса (УВК).

Для повышения точности определения управляющего воздействия осуществим масштабное преобразование в соответствии с выражением

$$\delta_i = \delta_i^* \cdot L_{\text{м}} / (C_{\text{св}} \cdot \Delta\tau_i), \qquad (8)$$

где $L_{\text{м}} = 100 = \mathrm{const}$ – целочисленный масштабный коэффициент.

После масштабного преобразования (8) получим:

$$\begin{gathered} \delta_i = \frac{L_{\text{м}}}{\Delta\tau_i C_{\text{св}}} \left(E_0 + T_\Pi V_0\right) + \\ + \sum_{k=1}^{i} \frac{L_{\text{м}}}{C_{\text{св}}} \left(T_\Pi W_k + V_k + \frac{1}{T_{\text{из}}} E_k\right) - L_\Pi S_k. \end{gathered} \qquad (9)$$

Выражение (9) может быть представлено в рекуррентной форме вида:

$$\begin{cases} \delta_0 = \dfrac{L_{\text{м}}}{\Delta\tau_i} \left(E_0 + T_n V_0\right) \\ \delta_k = \delta_{k-1} + \dfrac{L_{\text{м}}}{C_{\text{св}}} \left(T_\Pi W_k + V_k + \dfrac{1}{T_{\text{из}}} E_k\right) \end{cases} - L_n S_k, \qquad (10)$$

Для формирования дискретного (цифрового) аналога ПИД-закона управления необходимо осуществлять вычисление трех сумм, используя множества заполненных сигналов рассогласования, рассредоточенных во времени:

$$\left.\begin{aligned} S_{1k} &= S_{1k-1} + Z_k - Z_{k-m} \\ S_{2k} &= S_{2k-1} + Z_k - Z_{k-2m} \\ S_{3k} &= S_{3k-1} + Z_k - Z_{k-3m} \end{aligned}\right\}, \qquad (11)$$

где S_{1k}, S_{2k}, S_{3k} – соответственно первая, вторая и третья суммы в *k*-й момент времени; Z_k – вычисленное в *k*-й момент времени значение сигнала рассогласования контура управления; *k* – текущий момент времени; *m* – количество суммируемых элементов $m \le (128/3) \approx 42$.

Количество суммируемых элементов определяется принятым значением постоянной времени цифрового фильтра Тф:

$$m = 1 + \frac{\text{Тф}}{\text{τф}}; \; \text{Тф} \le 42\text{τф}, \qquad (12)$$

где Тф – время, за которое происходит усреднение сигнала рассогласования, т.е. вычисляется его среднее значение.

Расчет величин рассогласования E_k при реализации цифрового закона управления осуществляется УВК в соответствии с выражением

$$E_k = \frac{1}{\text{м}} \left(K_1 \cdot S_{1k} + K_2 S_{2k} + K_3 S_{3k}\right), \qquad (13)$$

где E_k – дискретный аналог сигнала рассогласования; K_1, K_2, K_3 – весовые коэффициенты, связанные условием.

$$K_1 + K_2 + K_3 = 1; \; K_1 / K_2 = K_2 / K_3 = 1 + M, \qquad (14)$$

где М – показатель ослабления весовых коэффициентов или коэффициент предыстории.

При *M*=0 $K_1 = K_2 = K_3 = 1/3$;

M=1 $K_1 = 4/7; K_2 = 2/7; = K_3 = 1/7$;

M=2 $K_1 = 9/13; K_2 = 3/13; = K_3 = 1/13$.

Вычисление первой производной сигнала рассогласования V_k осуществляется в соответствии с выражением:

$$V_k = \frac{1}{m^2 \tau ф}\left[l_1\left(S_{1k} - S_{2k}\right) + l_2\left(S_{2k} - S_{3k}\right)\right], \quad (15)$$

где l_1, l_2 – весовые коэффициенты, связанные условием

$$l_1 + l_2 = 1; \; l_1/l_2 = 1 + M \,, \quad (16)$$

При M=0, $l_1 = l_2 = 1/2$; M=1, $l_1 = 2/3; l_2 = 1/3$; M=2, $l_1 = 3/4; l_2 = 1/4$.

Величина коэффициента предыстории M является параметром настройки цифрового контура управления и реально определяет степень влияния предыдущих значений сигнала рассогласования на формирование управляющего воздействия в текущий момент времени. Поскольку сигналы рассогласования первой и второй производных рассчитываются программно и разнесены во времени, то наибольший вес при формировании значений этих сигналов имеют величины текущих значений сигналов.

Вычисление значения второй производной W_k в цифровом контуре управления осуществляется в соответствии с выражением

$$W_k = \frac{1}{m^3 \tau^2 p}\left(S_{1k} + 2S_{2k} - S_{3k}\right). \quad (17)$$

С учетом ранеесказанного после соответствующих преобразований текущее значение функции ошибки $\delta_к$ вычисляется по формуле

$$\delta_к = \delta_{k-1} + C_1 S_{1k} + C_2 S_{2k} + C_3 S_{3k} - L_м S_k \,. \quad (18)$$

где

$$C_1 = \frac{T_П \cdot L_м}{m^3 C_{св} \cdot \eta_{зд}} + \frac{(1+m) L_м}{(m+2) \cdot m^2 C_{св}} + \frac{(1+m)^2 \cdot L_м \cdot n_{зд}}{T_{из} \cdot m \cdot C_{св}(3 + 3m + m^2)}, \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{(1+m)^2 \cdot L_м \cdot n_{зд}}{T_{из} \cdot m \cdot C_{св}(3 + 3m + m^2)} - \frac{m \cdot L_м}{m^2 (m+2) C_{св}} - \frac{2T_n \cdot L_м}{\eta_{зд} m^2 C_{св}}, \quad (20)$$

$$C_3 = \frac{T_П \cdot L_м}{\eta_{зд} m^2 C_{св}} - \frac{L_м}{(2+m) m^2 C_{св}} + \frac{\eta_{зд} \cdot L_м}{T_{из} \cdot m \cdot C_{св}(3 + 3m + m^2)}, \quad (21)$$

где $T_П, T_{из}$ – соответственно время предварения и время изодрома, равное отношению периода опроса датчиков (1 с) к периоду таймера (0,2 с), в рассматриваемом случае принято $\eta_{зд} = 5$.

Влияние составляющей δ_0 даже в момент неустановившегося режима можно не учитывать, так как влияние этого параметра ощутимо только в первые 5-6 с работы контура.

Для обеспечения устойчивой работы цифрового контура управления при формировании переключательной функции S_k кроме условия (6) накладываются дополнительные ограничения на величины δ_1 и δ_2 :

$$\delta_1 > \delta_2 \,, \quad (22)$$

$$\left| \; 2\delta_1 \; \right| > L_м \cdot S_k \,. \quad (23)$$

При реализации цифровых ПИ и ПИД законов управления память УВК распределяется следующим образом. Информация о конфигурации каждого контура управления и заданны значений технологических параметров этих контуров хранится в массиве параметров настроек. Информация о номерах датчиков и задатчиков и их реальных градуировочных характеристиках всех используемых контуров управления хранятся в массиве датчиков. Отмеченные массивы в память УВМ записываются (загружаются) в процессе начального диалога с УВК одновременно с управляющей программой с монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) и технолога оператора.

Вычисление сумм S_{1k}, S_{2k}, S_{3k} и фильтрация данных осуществляется в массиве фильтрации. Информация о суммах, величинах коэффициентах C_1, C_2, C_3 и требуемых направлениях ходов исполнительных механизмов всех контуров управления хранится в массиве переменных данных.

В общем виде прямое цифровое управление при программно реализованном адаптивном централизованном управлении осуществляется в соответствии с алгоритмами: начального диалога; ввода сигналов с датчика дискретных и аналоговых датчиков и задатчиков; расчета сигналов рассогласования; расчета сигнала ошибки; расчета ходов исполнительных механизмов и сигнала обратной связи.

Подробное описание работы блок-схем каждого алгоритма приведено в работах [1, 2].

Достоинством разработанной управляющей программы, функционирующей в реальном масштабе времени, является минимизация времени использования прерываний и возможность выполнения расчетов хода ИМ в каждом такте.

Блочное построение управляющей программы обеспечивает многократное использование одних и тех же блоков. Синхронизация в массивах осуществляется по задачам, а не по системам. Это позволило реально осуществить управление тепловым режимом методической печи по 12 контурам с использованием УВК, имеющего объем оперативной памяти всего в 32 кбайта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самонастраивающаяся система для управления тепловым режимом печей / Б.Н. Парсункин, Д.Г. Шестеркин, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1987. №11.

2. Автоматическая система прямого цифрового управления нагревом металла / Б.Н. Парсункин, Д.Г. Шестеркин, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1985. №3.

3. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. №2. С.18-29.

4. Рябчиков М.Ю., Андреев С.М., Рябчикова Е.С.Алгоритмы и способы самонастройки средств регулирования в современных микропроцессорных контроллерах: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 136 с.

5. Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, С.М. Андреев, и др. // Автоматизация в промышленности. 2010. №11. С.32-37.

6. Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства: монография / Б.Н. Парсункин, С.М, Андреев, О.С. Логунова, Т.У. Ахметов. Магнитогорск: Полиграфия, 2012. 406 с.

7. Адаптивные статистические модели, синтезированные на основе ИНС / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова, Галдин М.С., Ахметов Т.У. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4. С. 68–71.

8. Адаптивная система автоматического управления стохастическими нелинейными процессами / Н.А. Головко, О.С. Логунова, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Научное обозрение. 2013. №1. С.166-170.

INFORMATION IN ENGLISH

A MATHEMATICAL MODEL OF ACTIVE STABILIZER CIRCUIT FOR DIGITAL CENTRALIZED AUTOMATIC CONTROL TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Parsunkin B.N., Obukhov G.F., Obukhova T. G., Ahmetova A.U.

A mathematical model of a digital loop automatic control synthesis, which is implemented in software using limited volume of the random access memory of microprocessor regulating controller (MRC), is provided.

Keywords: the model law of management, a mismatch signal, discrete analogs of derivatives, prehistory of management, the control action.

REFERENCES

1. Parsunkin B.N., Shesterkin D.G., Obuhov G.F. and others. *Samonastraivayushchayasya sistema dlya upravleniya teplovym rezhimom pechej* [Self-adjusting system for control of conditions of furnaces].*Stal'* [Steel]. 1987, no.11.

2. Parsunkin B.N., Shesterkin D.G., Obuhov G.F. and others. *Avtomaticheskaya sistema pryamogo cifrovogo upravleniya nagrevom metalla* [Automatic system of direct digital control of metal heating]. *Stal'* [Steel]. 1985, no.3.

3. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Sistema optimal'nogo upravleniya teplovym rezhimom promyshlennyh pechej* [Optimal control system of industrial furnace thermal rate]. *Mashinostroenie: setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no. 2, pp. 18-29.

4. Ryabchikov M.Yu., Andreev S.M., Ryabchikova E.S. *Algoritmy i sposoby samonastrojki sredstv regulirovaniya v sovremennyh mikroprocessornyh kontrollerah: uchebnoe posobie* [Algorithms and methods for self-adjusting of control ways in a modern microprocessor controllers: textbook]. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 136 p.

5. Pol'ko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.YU., Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Algoritm nechetkogo upravleniya dlya sinteza cifrovyh konturov avtomaticheskoj stabilizacii tekhnologicheskih parametrov* [Fuzzy control algorithm for synthesis of a digital loop technological parameters automatic stabilization]. *Avtomatizaciya v promyshlennosti* [Industrial automatization]. 2010, no. 11, pp. 32-37.

6. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lokal'nye stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva: monografiya* [Local stabilizing loop of automatic control in industrial production ACS: monography]. Magnitogorsk. Poligrafiya, 2012, 406 p.

7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Obuhova T.G., Galdin M.S., Ahmetov T.U. *Adaptivnye statisticheskie modeli, sintezirovannye na osnove INS* [The adaptive statistical models, synthesized on the basis of the neural networks]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 68-71.

8. Golovko N.A., Logunova O.S., Parsunkin B.N., Andreev S.M. *Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya stohasticheskimi nelinejnymi processami* [Adaptive automatic control system of stochastic nonlinear processes]. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review]. 2013, no. 1, pp. 166-170.