

ПЕРЕБОРНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОДНОКАНАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ И БОЛЬШИМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Ульшин В.А., Зубов Д.А.

Восточнoукраинский национальный университет им. В.Даля

Функционирование технологических процессов (ТП) углеобогадательной фабрики (УОФ) характеризуется большим транспортным запаздыванием информации о выходных координатах, нестационарностью параметров, неизвестными вероятностными характеристиками возмущающих воздействий, имеющих аддитивный и мультипликативный характер, и другими усложняющими управление факторами [1-3]. В этих условиях не представляется возможным синтез систем оптимального автоматического управления с оперативной идентификацией пространства состояния на основе традиционных методик, которые дают удовлетворительные результаты при стационарных параметрах (например, [3]). Одним из эффективных путей повышения качества функционирования САУ является синтез оптимального управления на базе переборных алгоритмов. Возможность такого подхода обусловлена тем, что на практике управляющее воздействие изменяется в конечном диапазоне и с определённой, обусловленной характеристиками исполнительных механизмов дискретностью. Аппаратная реализация данного подхода в настоящее время возможна на базе современных высокопроизводительных контроллеров (например, IBM PC совместимые микроконтроллеры фирмы OCTAGON SYSTEMS серии 60x0 с Intel386SX).

Динамические свойства большинства объектов управления (ОУ) УОФ с достаточной для практики точностью аппроксимируются апериодическим звеном второго порядка с чистым запаздыванием [1]. Дискретная передаточная функция приведенной непрерывной части с экстраполятором нулевого порядка в скалярной форме имеет следующий вид [3]:

$$y_k = b_{1,k}u_{k-d_k-1} + b_{2,k}u_{k-d_k-2} - a_{1,k}y_{k-1} - a_{2,k}y_{k-2} + h_{0,k}, \quad (1)$$

где k – номер текущего такта управления, $k \in \mathbb{Z}$ (\mathbb{Z} – множество целых чисел);

y_k, u_k – выходная координата и управляющее воздействие в дискретный момент времени k ($y_k, u_k \in \mathbb{R}$, где \mathbb{R} – множество вещественных чисел);

$h_{o,k}$ – случайный нормальнораспределённый шум объекта с нулевым математическим ожиданием и ограниченным среднеквадратическим отклонением $\sigma_{o,k}$ в дискретный момент времени k (при наблюдении y_k также смешивается со случайным нормальнораспределённым шумом наблюдения $h_{н,k}$, имеющем нулевое математическое ожидание и ограниченное среднеквадратическое отклонение $\sigma_{н,k}$), $\sigma_{o,k}, \sigma_{н,k} \in \mathbb{R}$;

d_k – нестационарное дискретное запаздывание в дискретный момент времени k , $d_k > 0$, $d_k \in \mathbb{Z}$;

$$a_{1,k} = -\left(e^{-T_0/T_{1,k}} + e^{-T_0/T_{2,k}}\right), a_{1,k} \in \mathbb{R};$$

$$a_{2,k} = e^{-T_0/T_{1,k}} e^{-T_0/T_{2,k}}, a_{2,k} \in \mathbb{R};$$

$$b_{1,k} = k_{o,k} \left(1 + \frac{T_{2,k} e^{-T_0/T_{2,k}} - T_{1,k} e^{-T_0/T_{1,k}}}{T_{1,k} - T_{2,k}} \right), b_{1,k} \in \mathbb{R};$$

$$b_{2,k} = k_{o,k} \left(e^{-T_0/T_{1,k}} e^{-T_0/T_{2,k}} + \frac{T_{2,k} e^{-T_0/T_{1,k}} - T_{1,k} e^{-T_0/T_{2,k}}}{T_{1,k} - T_{2,k}} \right), b_{2,k} \in \mathbb{R};$$

T_0 – период квантования, $T_0 \in \mathbb{R}$;

$k_{o,k}, T_{1,k}, T_{2,k}$ – нестационарные положительные коэффициент усиления, первая и вторая постоянные времени ОУ в дискретный момент k , $k_{o,k}, T_{1,k}, T_{2,k} \in \mathbb{R}$.

Начальные условия:

$$y_0 = y_0^0;$$

$$u_0 = u_0^0;$$

где y_0^0, u_0^0 – положительные константы, $y_0^0, u_0^0 \in \mathbb{R}$.

Ограничения на выходные величины, управляющие и возмущающие воздействия, запаздывание объекта (1):

$$\begin{aligned}
 y_{\min} &\leq y_k \leq y_{\max}; \\
 u_{\min} &\leq u_k \leq u_{\max}; \\
 u_k - u_{k-1} &= v \cdot u_{\min}^*; \\
 \sigma_{H,k} + \sigma_{o,k} &\leq \sigma_{\max}; \\
 d_{\min} &\leq d_k \leq d_{\max},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где u_{\min}^* – дискретный шаг изменения управляющего воздействия,
 $u_{\min}^* \in \mathbb{R}$;

v – множитель дискретного шага изменения управляющего
 воздействия, $v \in \mathbb{Z}$;

d_{\min} , y_{\min} , u_{\min} – неотрицательные константы, $d_{\min} \in \mathbb{Z}$, y_{\min} , $u_{\min} \in \mathbb{R}$.

d_{\max} , y_{\max} , u_{\max} , σ_{\max} – положительные константы, $d_{\max} \in \mathbb{Z}$, y_{\max} ,
 u_{\max} , $\sigma_{\max} \in \mathbb{R}$.

ОУ УОФ обладают свойством самовыравнивания, что отражено
 в ограничении (2) [1].

В работе [3] показывается, что рассматриваемый класс объектов
 (1) вполне управляем при всех и наблюдаем при определённых
 значениях параметров. Для определения идентифицируемости
 рассчитывается ранг матрицы I для случая $d_k=1$ [4]:

$$I = \begin{pmatrix} x_{1,0} & x_{2,0} & x_{3,0} \\ x_{2,0} & x_{3,0} & -a_{2,k}x_{2,0} - a_{1,k}x_{3,0} \\ x_{3,0} & -a_{2,k}x_{2,0} - a_{1,k}x_{3,0} & a_{1,k}a_{2,k}x_{2,0} + (a_{1,k}^2 - a_{2,k})x_{3,0} \end{pmatrix},$$

где $x_{1,0}$, $x_{2,0}$, $x_{3,0}$ – начальные значения вектора переменных
 пространства состояний [3].

ОУ вполне идентифицируем при $\text{Rank}(I)=3$, т.е. при
 выполнении условия

$$\begin{aligned}
 &x_{1,0}x_{2,0}x_{3,0}a_{1,k}a_{2,k} + x_{1,0}x_{3,0}^2a_{2,k} + x_{1,0}x_{2,0}^2a_{2,k}^2 + x_{2,0}^3a_{1,k}a_{2,k} + \\
 &+ x_{2,0}^2x_{3,0}a_{1,k}^2 + 2x_{2,0}x_{3,0}^2a_{1,k} + x_{2,0}^2x_{3,0}a_{2,k} + x_{3,0}^3 \neq 0.
 \end{aligned}$$

Таким образом, рассматриваемый класс объектов (1) вполне
 управляем при всех и наблюдаем и идентифицируем при
 определённых значениях параметров, конкретные значения которых

определяются в натурном эксперименте или компьютерном моделировании.

Для оценивания параметров ОУ (1) выходная величина фильтруется методом стохастической аппроксимации [5]:

$$y_k^* = y_{k-1}^* + k_a (y_k - y_{k-1}^*),$$

где y_k^* – аппроксимируемое значение выходной координаты;

k_a – в общем случае переменный во времени коэффициент (при исследовании имел постоянное равное 0,5 значение), удовлетворяющий условиям теоремы Дворецкого.

Аппроксимирующая модель ОУ представляется в виде:

$$y_k^* = c_k + b_{1,k}^* u_{k-1-d_k^*} + b_{2,k}^* u_{k-2-d_k^*} + a_{1,k}^* y_{k-1}^* + a_{2,k}^* y_{k-2}^* \quad (3)$$

где $c_k, b_{1,k}^*, b_{2,k}^*, a_{1,k}^*, a_{2,k}^*, d_k^*$ – константы, аппроксимируемые методом наименьших квадратов на обучающей выборке данных длиной N_e для дискретного момента времени k , $c_k, b_{1,k}^*, b_{2,k}^*, a_{1,k}^*, a_{2,k}^* \in \mathbb{R}, d_k^* \in \mathbb{Z}$.

С учётом ограничения (2) и максимального среднеквадратического отклонения шумов объекта и наблюдения σ_{\max} элементы $y_{m,n}^{**}$ (m – номер элементы в обучающей выборке, $m=1, \dots, N_e$; n – номер дискретного момента времени, т.е. $n=k$; $m, n \in \mathbb{Z}$) обучающей выборки формируются данными, удовлетворяющими условию:

$$(y_{\min} + \sigma_{\max}) < y_k^* < (y_{\max} - \sigma_{\max}). \quad (4)$$

Критерий функционирования системы управления для объекта (1) в общем случае представляется квадратичным функционалом качества на скользящем интервале оптимизации [6]:

$$J = f(y_3 - y_{k+d_k^*+\gamma}^*)^2 + \sum_{i=k+d_k^*}^{k+d_k^*+\gamma-1} \left[q(y_3 - y_{i+1}^*)^2 + r u_{i-d_k^*}^2 \right] \rightarrow \min, \quad (5)$$

где f, q, r – неотрицательные весовые коэффициенты, $f, q, r \in \mathbb{R}$;

i – сервисная переменная, $i=(k+d_k^*), \dots, (k+d_k^*+\gamma-1), i \in \mathbb{Z}$;

y_3 – задание выходной координаты, $y_3 \in \mathbb{R}$;

γ – длина скользящего интервала оптимизации, $\gamma \in \mathbb{Z}$.

Использование скользящего интервала оптимизации обуславливается следующим: уменьшение вычислительных затрат – без ущерба для оптимальности γ принимается меньшим всего интервала управления, который может быть бесконечным; оперативный учёт изменяющихся характеристик возмущающих воздействий и ОУ; система (1) более устойчива к неконтролируемым возмущениям и неточностям математического описания.

На основе вышеизложенного переборный алгоритм управления одноканальными объектами углеобогадительного производства с большим запаздыванием и нестационарными параметрами имеет следующий вид:

1. Инициализация констант y_0^0 , u_0^0 , d_{\min} , d_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , u_{\min} , u_{\max} , u_{\min}^* , σ_{\max} , k_a , f , q , r , γ , Y_z , T_0 , N_e .

2. Подача равномернораспределённых на интервале (u_{\min}, u_{\max}) случайных управляющих воздействий на вход ОУ (при исследовании проводилось в течение $4000T_0$) для формирования начальной обучающей выборки.

3. Формирование обучающей выборки на основе пробных управляющих воздействий (п.2).

4. Расчёт коэффициентов $c_0, b_{1,0}^*, b_{2,0}^*, a_{1,0}^*, a_{2,0}^*$ аппроксимирующей модели (3) на обучающей выборке.

5. Текущий дискретный момент времени $k=1$.

6. Присвоение значений $c_{k-1}, b_{1,k-1}^*, b_{2,k-1}^*, a_{1,k-1}^*, a_{2,k-1}^*, d_{k-1}^*$ соответствующим константам $c_k, b_{1,k}^*, b_{2,k}^*, a_{1,k}^*, a_{2,k}^*, d_k^*$.

7. Определение значения выходной координаты y_k по формуле (1).

8. Экстраполирование аппроксимированного значения выходной координаты ($j=1, \dots, d_k^*$):

$$y_{k+j}^* = c_k + b_{1,k}^* u_{k-1-d_k^*+j} + b_{2,k}^* u_{k-2-d_k^*+j} + a_{1,k}^* y_{k-1+j}^* + a_{2,k}^* y_{k-2+j}^*.$$

9. Вычисление оптимального управления u_k (с соответствующим экстраполированием выходных координат):

$$u_k = \arg \left(\min_{u_k \quad u_{\min} \leq u_{i-d_k^*} \leq u_{\max}} (f(y_3 - y_{k+d_k^*+\gamma}^*)^2 + \sum_{i=k+d_k^*}^{k+d_k^*+\gamma-1} [q(y_3 - y_{i+1}^*)^2 + ru_{i-d_k^*}^2]) \right).$$

10. Если $\text{mod}(k, N_e) = 0$ (mod – остаток целочисленного деления первого аргумента на второй), то аппроксимация запаздывания по формуле:

$$d_k^* = \arg \left(\min_{d_{\min} \leq d_k^* \leq d_{\max}} \left(\sum_{m=1}^{N_e} \left| y_{m,n}^{**} - c_{d_k^*} - b_{1,d_k^*} u_{n-1-d_k^*} - b_{2,d_k^*} u_{n-2-d_k^*} - a_{1,d_k^*} y_{n-1}^* - a_{2,d_k^*} y_{n-2}^* \right| \right) \right)$$

где коэффициенты $c_{d_k^*}, b_{1,d_k^*}, b_{2,d_k^*}, a_{1,d_k^*}, a_{2,d_k^*}$ вычисляются на обучающей выборке методом наименьших квадратов для соответствующего значения d_k^* . Результатом данного этапа являются новые коэффициенты $c_k, b_{1,k}, b_{2,k}, a_{1,k}, a_{2,k}, d_k^*$.

11. Если выполняется неравенство (4), то пополнение обучающей выборки элементом u_k^* (при этом происходит сдвиг элементов, меньший номер из которых удаляется).

12. Увеличение дискретного времени $k=k+1$. Переход к п.6.

Для моделирования адаптивной системы на ЭВМ синтезировано специализированное программное обеспечение на основе языка программирования Delphi, позволяющее в реальном масштабе времени исследовать влияние изменения параметров $N_e, \sigma_{H,k}, \sigma_{o,k}, u_3, d, T_{2,k}, k_{o,k}, u_{\min}^*, k_a$ на среднеквадратическое отклонение выходной координаты σ от u_3 и среднее значение аппроксимируемого запаздывания $M\{d_k^*\}$.

При исследовании переменные имели следующие значения (в качестве примера рассматривается флотация углей и канал управления дозирование реагента-пенообразователя Т-66 – зольность флотоконцентрата [1,7]): $d_{\min}=180$ с, $d_{\max}=230$ с (при исследовании влияния d на σ и $M\{d_k^*\}$ $d_{\min}=10$ с, $d_{\max}=700$ с), $u_{\min}=5$ %, $u_{\max}=30$ %, $\sigma_{H,k}=0,01$ %, $\sigma_{o,k}=0,01$ %, $k_a=0,01$ с, $N_e=10$.

$u_{\min}=0$ г/т, $u_{\max}=80$ г/т, $u_{\min}^*=1$ г/т, $\sigma_{\max}=1$ %, $k_a=0,5$, $f=0$, $q=1$, $r=0$, $\gamma=1$, $y_3=15$ %, $N_e=2000$, $y_0^0=y_{\max}=30$ %, $u_0^0=0$, $T_{1,k}=270$ с, $T_{2,k}=290$ с, $k_{o,k}=0,257$, $d=200$ с, $\sigma_{o,k}=0,0001$ %, $\sigma_{n,k}=0,01$ %, $k=1, \dots, 50000$.

Период квантования T_0 вычисляется по заданной точности управления $\varepsilon=0,01$ [8]. Для рассматриваемого ОУ в виде апериодического звена второго порядка с запаздыванием (в данной методике запаздывание не влияет на выбор T_0 и поэтому в расчетах не участвует)

$$T_0 \leq \frac{\varepsilon(T_{1,k} + T_{2,k})}{k_{o,k}} = \frac{0,01(270 + 290)}{0,257} = 21,79 \text{ с.}$$

Для исследований принимается $T_0=1$ с.

Пример функционирования системы автоматического управления для вышеприведенных параметров представлен на рис.1, где изображен фрагмент выборки данных зольности флотоконцентрата (выходная координата) и удельного расхода реагента-пенообразователя (управляющее воздействие).

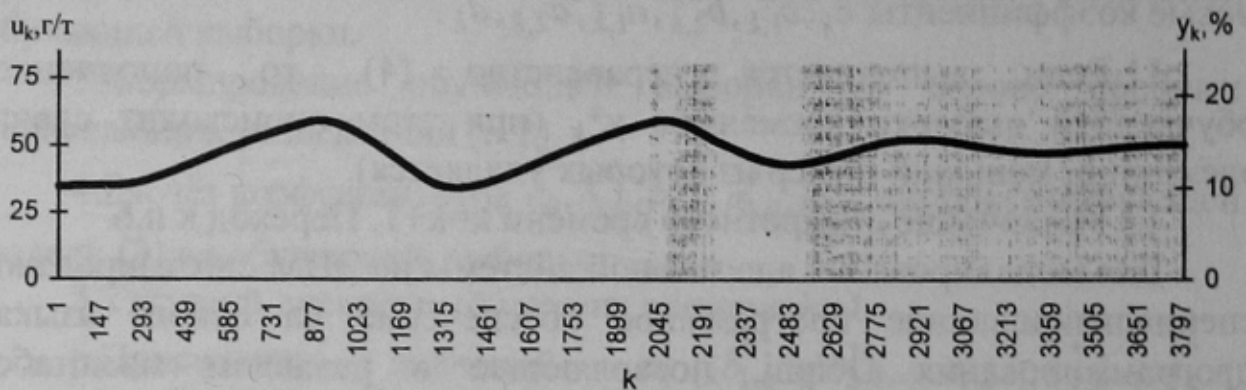


Рисунок 1 - Фрагмент выборки данных зольности флотоконцентрата и удельного расхода реагента-пенообразователя

- - - Удельный расход реагента-пенообразователя, г/т
 — Зольность флотоконцентрата, %

Анализ изменения зольности флотоконцентрата (см.рис.1) показывает её асимптотическую сходимость к заданному значению ($y_3=15$ %).

Результаты исследований влияния изменения параметров N_e , $\sigma_{H,k}$, $\sigma_{o,k}$, u_3 , d_k , $T_{2,k}$, $k_{o,k}$, u_{min}^* , k_a на среднеквадратическое отклонение выходной координаты σ от u_3 и среднее значение аппроксимируемого запаздывания $M\{d_k^*\}$ представлены на рис.2. Анализ полученных данных показывает:

1. Изменение N_e , $\sigma_{H,k}$, $\sigma_{o,k}$, u_3 , $T_{2,k}$, $k_{o,k}$, u_{min}^* , k_a не оказывает значительного влияния на $M\{d_k^*\}$.

2. При увеличении d_k пропорционально увеличивается $M\{d_k^*\}$.

3. Изменение u_{min}^* , u_3 , d_k , $T_{2,k}$, не оказывает значительного влияния на σ .

4. σ скачкообразно возрастает при уменьшении ниже определенной границы N_e (≈ 500 с), $k_{o,k}$ ($k_{o,k} \approx 0,19$), k_a ($k_a \approx 0,1$).

5. При увеличении $\sigma_{H,k}$, $\sigma_{o,k}$ пропорционально увеличивается σ .

6. Анализ данных рис.2з и рис.1 показывает возможность синтеза управления для случая $u_{min}^* = u_{max} - u_{min}$, что позволяет использовать достаточно большие значения длины скользящего интервала оптимизации γ .

По качественным показателям функционирование предложенного алгоритма управления аналогично оптимальной системе [3], где известны и постоянны все внешние и внутренние параметры.

Таким образом, для рассматриваемого класса объектов (1) при использовании предлагаемого переборного алгоритма управления основная задача настройки системы на практике сводится к выбору максимально большего объема обучающей выборки для аппроксимации коэффициентов модели (3), который ограничивается вычислительными ресурсами аппаратной части САУ.

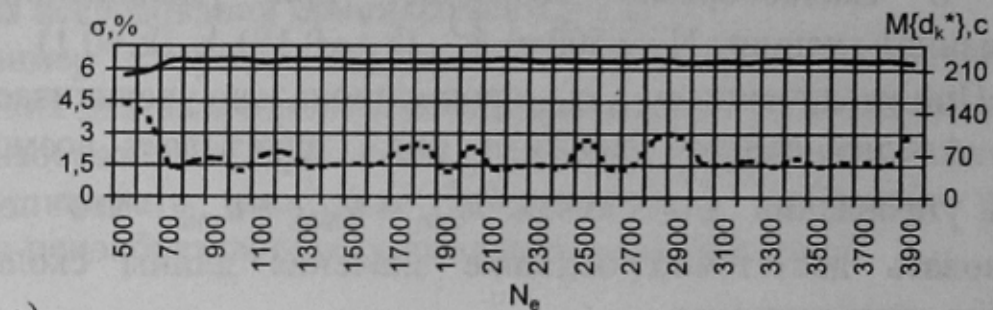
Выводы.

1. Показано, что синтез оптимального управления объектами (1) по заданному критерию (5) можно осуществить с использованием переборных алгоритмов и прогнозирования его состояния на основе аппроксимирующей модели (3), коэффициенты которой вычисляются на обучающей выборке данных методом наименьших квадратов.

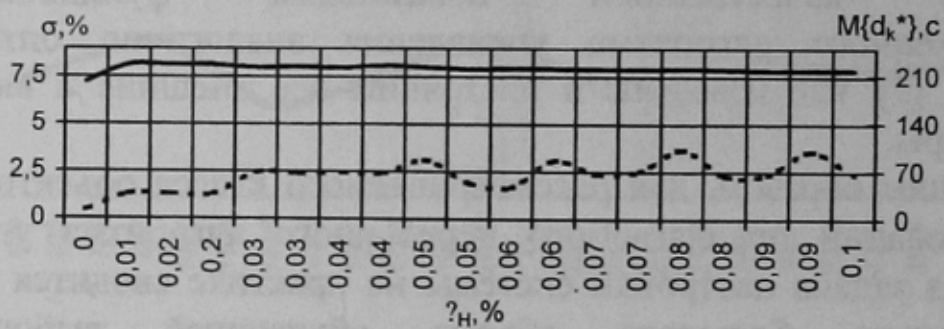
2. Показана работоспособность предложенного алгоритма управления в исследуемом диапазоне варьируемых параметров (N_e , $\sigma_{H,k}$, $\sigma_{o,k}$, u_3 , d_k , $T_{2,k}$, $k_{o,k}$, u_{\min}^* , k_a).

3. Настройка алгоритма управления сводится к выбору максимально большего объема обучающей выборки для аппроксимации коэффициентов модели (3), который ограничивается вычислительными ресурсами аппаратной части САУ.

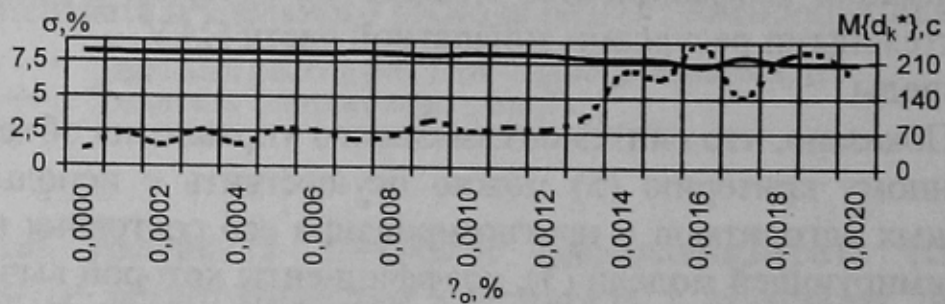
4. Предложенные алгоритмы управления могут использоваться в многоканальных системах, где имеются нелинейные зависимости входных и выходных величин и синтез САУ традиционными методами линейных систем не представляется возможным.



а)

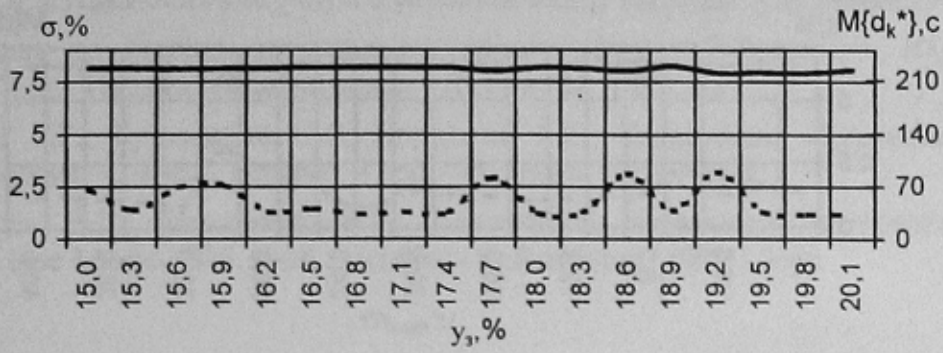


б)

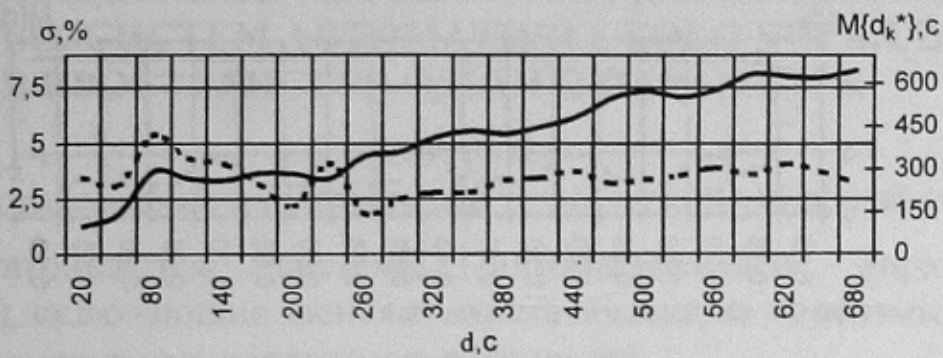


в)

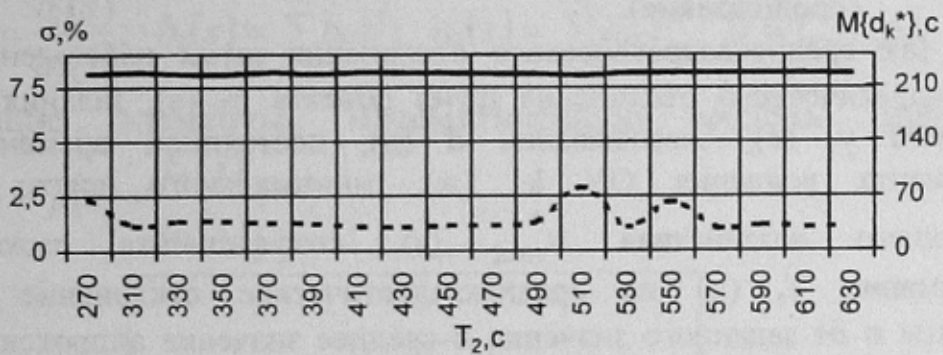
Рисунок 2 - Результаты исследования влияния длины обучающей выборки



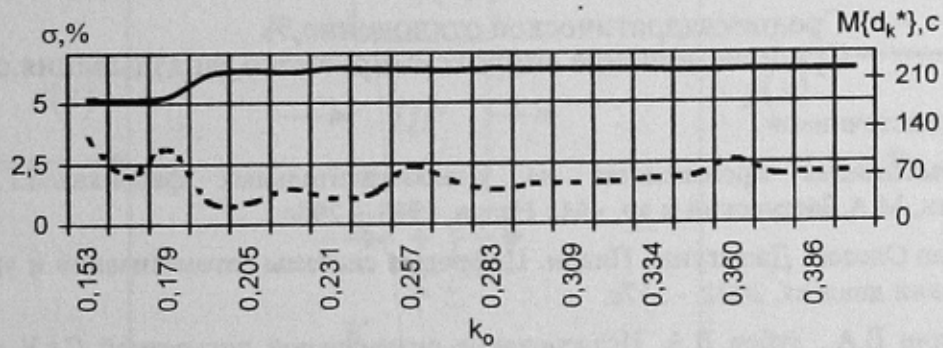
Г)



Д)

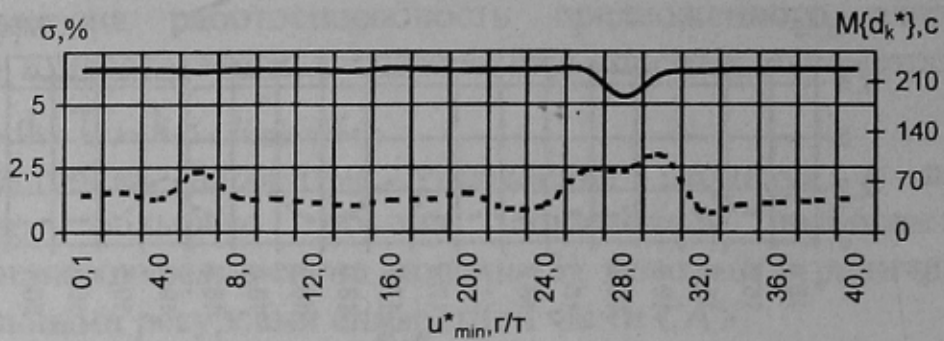


е)

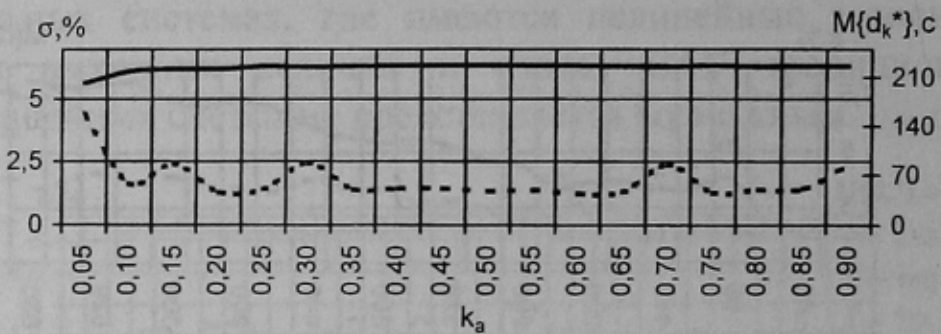


ж)

Рисунок 2 - Результаты исследования влияния длины обучающей выборки (продолжение).



з)



и)

Рисунок 2 - Результаты исследования влияния длины обучающей выборки (продолжение).

N_e (а), середньоквадратического відхилення шуму спостереження σ_n (б), середньоквадратического відхилення шуму об'єкта σ_o (в), задання зольності концентрата u_z (г), запаздывання d (д), постійної часу T_2 (е), коефіцієнта посилення ОУ k_o (ж), мінімального кроку зміни керуючого впливу u_{min}^* (з), коефіцієнта стохастическої апроксимації k_a (и) на середньоквадратическе відхилення вихідної координати σ від заданого значення і середнє значення апроксимованого запаздывання $M\{d_k^*\}$

- - - Середньоквадратическе відхилення, %

— Середнє значення апроксимованого запаздывання, с

Список источников

1. Автоматизация производства на углеобогатительных фабриках/Л.Г.Мелькумов, В.А.Ульшин, М.А.Бастунский и др. - М.: Недра, 1983. - 295с.

2. Густав Олссон, Джангуидо Пиани. Цифровые системы автоматизации и управления. - СПб.: Невский диалект, 2001. - 557с.

3. Ульшин В.А., Зубов Д.А. Исследование оптимальной дискретной САУ объектами с большим запаздыванием в пространстве состояний// Вісник СУДУ. - 1999. - №4(14).-С.23-31.

4. Автоматика и управление в технических системах: В 11 кн./ Отв. ред. С.В.Емельянов, В.С.Михалевич. - К.: Выща шк., 1990. - Кн.2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами/ В.Н.Киричков; Под ред. А.А.Краснопрошиной. - 263с.

5.Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. - М.:Наука,1966.-400с.

6.Справочник по типовым программам моделирования/ А.Г.Ивахненко, Ю.В.Коппа, В.С.Степашко и др.; Под.ред. А.Г.Ивахненко. - К.:Техніка, 1980. - 184с.

7.Фоменко Т.Г., Бутовецкий В.С. Погарцева Е.М. Технология обогащения углей: Справочное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.:Недра, 1985. - 367с.

8.Романенко В.Д., Игнатенко Б.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе МикроЭВМ: Учеб. пособие. - К.:Выща шк., 1990. - 334с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ОДНОГО ПАРАМЕТРА

Беляева Л.Л.,

Севастопольский национальный технический университет

Рассматриваются системы автоматического управления (рисунок 1), включающие звенья с математическими моделями в виде дробно-рациональных передаточных функций

$$W_i(s) = \frac{b_i(s)}{a_i(s)}; \quad b_i(s) = \sum_{l=0}^{m_i} b_{il}s^l; \quad a_i(s) = \sum_{k=0}^{n_i} a_{ik}s^k \quad (i = 1, \dots, g),$$

суммирующие элементы, математическую модель цифрового регулятора $W_P(z) = \frac{b_1(z)}{a_1(z)}$.

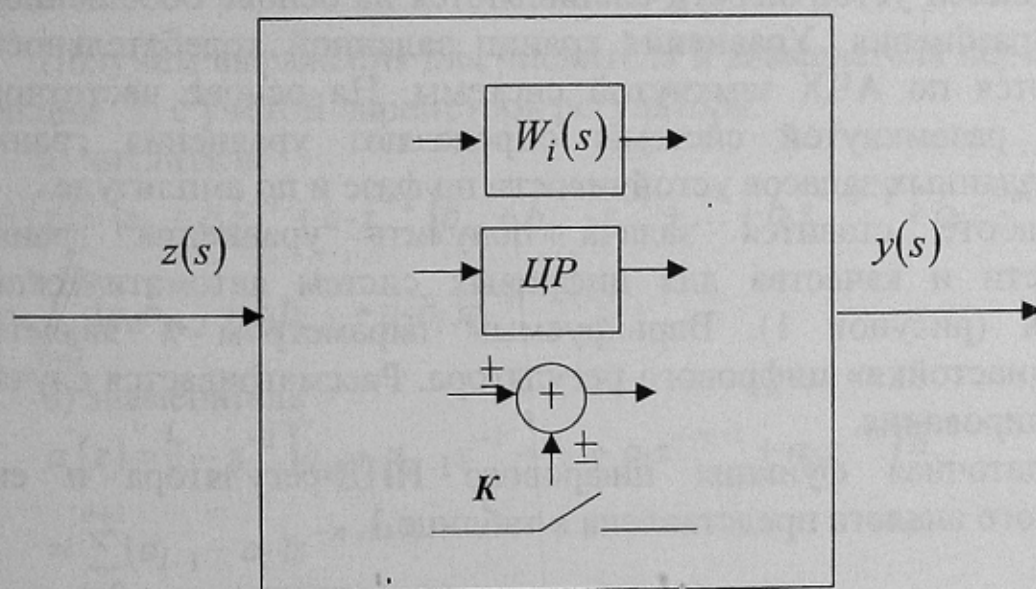


Рисунок 1 - Общая структура цифровой САУ